

Schweißen unter einachsiger, zyklischer Beanspruchung Experimentelle und numerische Untersuchungen

Von der
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Dipl.-Ing. Michael Wichers
aus Stade

Eingereicht am 20. Januar 2006

Mündliche Prüfung am 12. Juni 2006

Berichterstatter Prof. Dr.-Ing. Udo Peil
Prof. a.D. Dr.-Ing. Helmut Wohlfahrt

2006

Die Dissertation wird von der Universitätsbibliothek Braunschweig unter der Adresse

<http://www.digibib.tu-bs.de>

in elektronischer Form veröffentlicht.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Stahlbau der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Die Finanzierung dieser Arbeit erfolgte durch ein von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördertes Forschungsprojekt sowie durch Sachspenden aus der Industrie. Hierfür sei herzlich gedankt.

Meinem akademischen Lehrer und Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Udo Peil, gilt mein besonderer Dank. Seine geduldige und freundliche Natur, die Bereitschaft zur Diskussion sowie seine fördernde Unterstützung und das Vertrauen in meine Person, waren stets der Ansporn, der zum Gelingen dieser Arbeit beitrug.

Herrn Prof. a.D. Dr.-Ing. Helmut Wohlfahrt danke ich herzlich für die Übernahme des Korreferates sowie das fortwährende Interesse an meiner Arbeit.

Für die Übernahme des Vorsitzes im Prüfungsausschuss gilt mein herzlichster Dank Herrn Prof. em. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Joachim Scheer. Aufgrund seiner hervorragenden Reputation als Ingenieur und Lehrer ehren mich sein persönliches Interesse sowie die Unterstützung meiner Arbeit im besonderen Maße.

Herrn Prof. em. Dr.-Ing. habil. Dr. E.h. Ferdinand Rostásy danke ich für seine wohlwollende Unterstützung sowie die Bereitschaft als Prüfer zur Verfügung zustehen.

Die Herstellung des Versuchstandes und die praktische Versuchsdurchführung sowie die begleitenden Untersuchungen wären ohne die Mithilfe der technischen Mitarbeiter am Institut für Stahlbau nicht möglich gewesen. Dafür mein aufrichtiger Dank. Im besonderen Maße möchte ich mich bei Herrn Stephan Amelung, Werkstattleiter, Herrn Nils Neppe, Feinwerkmechanikermeister und Herrn Andreas Limbach, Messtechniker, für ihr unermüdliches und persönliches Engagement bedanken.

Meinen Mentoren und ehemaligen Dozenten an der Fachhochschule Buxtehude, Frau Prof. Dr.-Ing. Maritta Petersen, Herrn Prof. Dr.-Ing. Jens Götsche, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Born und Frau Prof. Dr.-Ing. Birgit Brinkmann, sage ich Dank für die vielen persönlichen Gespräche und Ratschläge.

Für ihre immerwährende liebevolle Unterstützung auf meinem Lebensweg danke ich meinen Eltern von Herzen.

Meiner Frau Sonja möchte ich Danksagen für ihre Unterstützung sowie ihres Verständnisses, hinsichtlich des Verzichts auf viele gemeinsame Stunden.

Kiel, im Juni 2006

Michael Wichers

Sponsoren des Forschungsvorhabens

August Friedberg GmbH, Gelsenkirchen	Schrauben und Verbindungsmittel
Bandelin GmbH, Berlin	Ultraschallreinigungsbad
Bochem Instrumente GmbH, Weilburg	Laborbedarf aus Metall
Brand GmbH & Co. KG, Wertheim	Pipetten, Messzylinder
Bühler GmbH, Düsseldorf	Schleif- und Poliermaschine
DMG Gildemeister AG, Bielefeld	Drehmaschine NEF 320
Deutsche Electraplan GmbH, Hamburg	Elektrische Bedarfsmittel
AG der Dillinger Hüttenwerke, Dillingen	Maschinenbau- und Feinkornstähle
Drägerwerk AG, Lübeck	Atemschutz
Dremel Deutschland, Leinfelden-Echterdingen	Schneidwerkzeug
Eppendorf AG, Hamburg	Pipetten
Friedrich Lütze GmbH & Co. KG, Weinstadt	Digitale E/A-Module
Fronius International GmbH, Wels	Schweißgerät, Messtechnik
GTM Messtechnik, Bickenbach	Kraftmessdosen
HAWE Hydraulik GmbH & Co. KG, München	Ventileinheiten, Hydraulikbedarf
Herbert Hänchen GmbH & Co. KG, Ostfildern	Lagerdichtungen, Zylinderhydraulik
W. Haldenwanger GmbH & Co. KG, Waldkraiburg	Laborkeramik
Hch. Perschmann GmbH, Braunschweig	Fräs- und Drehwerkzeuge
Glaswarenfabrik Karl Hecht KG, Sondheim	Laborglas
HellermannTyton GmbH, Tornesch	Schrumpf- und Isolierschläuche
Heraeus Kulzer GmbH & Co. KG, Hanau	Schleif-, Polier- und Einbettmittel
Hermann Kleinhuis GmbH & Co. KG	Elektrische Bedarfsmittel
Hilti Deutschland GmbH, Kaufering	Anker, Setzwerkzeuge
Hirschmann Laborgeräte GmbH & Co. KG	Laborgläser
Hydac International GmbH, Sulzbach	Kolbenspeicher, Leckölpumpe
ICI Paints Deco GmbH, Hilden	Dispersionsfarbe, Lacke
IKA-Werke GmbH & Co. KG, Staufen	Magnetrührer
Kemper GmbH, Vreden	Schweißschutzwände
KGW Isotherm GmbH, Karlsruhe	Dewargefäße
KUKA Roboter GmbH, Augsburg	Roboterhardware
U.I. Lapp GmbH, Stuttgart	Mess- und Leitungskabel
Leica Microsystems AG, Wetzlar	Auf- und Durchlichtmikroskop
Paul Marienfeld GmbH & Co. KG	Laborglas
Micro Epsilon GmbH & Co. KG, Ortenburg	Wirbelstromwegmeßsystem
Moeller Electric GmbH, Bonn	Elektrische Bedarfsmittel
neoLab Migge Laborbedarf-Vertriebs GmbH	Laborgläser
Oerlikon Schweißtechnik GmbH, Eisenberg	Schweißzusatzwerkstoffe
OMNILAB-Laborzentrum GmbH & Co. KG, Bremen	Laborbedarf
Pagel Spezialbeton GmbH & Co. KG, Essen	Vergussmörtel
PALL GmbH, Dreieich	Hochdruckfilter, Adapterplatten
Parker Hannifin GmbH, Kaarst	Drucksensoren

Phoenix Contact GmbH & Co. KG, Blomberg
ProConnecting GmbH, Burgebrach
Bosch Rexroth AG, Langenhagen
SAB Bröckskes GmbH & Co. KG, Viersen
Salzgitter AG
Peiner Träger GmbH, Peine
Salzgitter Flachstahl GmbH, Salzgitter
Ilseburger Grobblech GmbH, Ilseburg
Jos. Schneider Optische Werke GmbH
Schneider Electric GmbH, Ratingen
Stacon Stahlbau GmbH, Stade
Tietjen Automatisierte Prüftechnik, Bremen
WAGO Kontakttechnik GmbH & Co. KG, Minden
Wesemann GmbH & Co. KG, Syke
E. Zoller GmbH & Co. KG, Freiberg

Signalvervielfacher
Schaltnetzteile
Rollenschienenführungen
Mess- und Leitungskabel

Stahlprofile
Bleche
Blech
Servoventile, Steuerungselektronik
Elektronische Steuerelemente
Zuschnitte, CAD/CAM-Technik
Mess- und Auswertesoftware
Elektrische Bedarfsmittel
Laboreinrichtung
Einstell- und Messgerät

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Nomenklatur.....	V
Kapitel 1	
Einführung	1
1.1 Problemstellung, Motivation und Stand der Technik	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	5
Kapitel 2	
Entwicklung eines Zwei-Achsen-Prüfrahmens	9
2.1 Anforderungen an den Versuchsaufbau.....	9
2.2 Konstruktion und Ausführung	13
2.2.1 Übersicht und Funktionsprinzip	13
2.2.2 Versuchsrahmen und Probenhalterung.....	15
2.2.3 Hydraulikkomponenten	20
2.2.4 Schweißtechnische Ausstattung	22
2.2.5 Messtechnische Ausstattung.....	23
2.3 Ansteuerung und Messdatenerfassung.....	29
2.3.1 Versuchsablauf und zentrale Steuerung	29
2.3.2 Hydraulische Steuerung	32
2.3.3 Roboter- und Schweißsteuerung.....	35
Kapitel 3	
Schweißversuche unter einachsiger Nahtflankenbewegung	39
3.1 Allgemeine Überlegungen zur Versuchskonzeption	39
3.2 Schweißversuche bei zunächst vollständiger Bauteiltrennung	42
3.2.1 Versuchsbeschreibung.....	42
3.2.1.1 Werkstoffe und Probengeometrie	42
3.2.1.2 Schweißverfahren und –parameter	43
3.2.1.3 Parameterfeld der Bewegungsamplitude und Frequenz	46
3.2.2 Referenzschweißung ohne Nahtflankenbewegung	47
3.2.3 Auswertung der Schweißversuche und Zusammenfassung	49
3.2.3.1 Auswertung der Schweißversuche unter Bewegung bei anfänglicher Trennung der Probenbleche	49
3.2.3.2 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse und Schlussfolgerungen	60
3.3 Schweißversuche mit Eigenbadsicherung.....	62
3.3.1 Versuchsbeschreibung.....	62

3.3.1.1	Werkstoffe und Probengeometrie.....	62
3.3.1.2	Schweißverfahren und –parameter	62
3.3.1.3	Parameterfeld der Bewegungsamplitude und Frequenz	64
3.3.2	Referenzschweißung ohne Nahtflankenbewegung	65
3.3.3	Auswertung der Schweißversuche und Zusammenfassung.....	67
3.3.3.1	Auswertung der Schweißversuche mit Eigenbadsicherung.....	67
3.3.3.2	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse und Schlussfolgerungen.....	78

Kapitel 4

Tragfähigkeitsuntersuchung der Schweißverbindungen.....		79
4.1	Allgemeine Überlegungen und Vorgehensweise	79
4.2	Versuchseinrichtung und Aufbau.....	80
4.3	Tragfähigkeitsuntersuchung der Schweißproben mit anfänglicher Probentrennung.....	81
4.3.1	Probenform, Herstellung und Versuchsdurchführung.....	81
4.3.2	Zugversuche an Referenzschweißungen in Ruhe.....	82
4.3.3	Zugversuche an Schweißproben mit anfänglicher Probentrennung	86
4.3.4	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	95
4.4	Tragfähigkeitsuntersuchung der Schweißproben mit Eigenbadsicherung ..	97
4.4.1	Versuchsdurchführung, Probenform und Herstellung.....	97
4.4.2	Zugversuche an Referenzschweißungen in Ruhe.....	98
4.4.3	Zugversuche an Schweißproben mit Eigenbadsicherung.....	102
4.4.4	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	110

Kapitel 5

Metallurgische Untersuchungen	111
5.1 Allgemeine Grundlagen und Vorgehensweise.....	111
5.2 Qualitative Analyse des Werkstoffes und der Schweißnähte	113
5.3 Heißrisse	117
5.3.1 Voraussetzung und Arten der Heißrisssbildung	117
5.3.2 Theorie der Heißrissentstehung	118
5.3.3 Beurteilung der Schweißnähte und Schlussfolgerungen	120

Kapitel 6

Bestimmung der temperaturabhängigen Werkstoffkennwerte.....		123
6.1	Notwendigkeit der Bestimmung und Voraussetzungen	123
6.2	Kerbschlagbiegeversuch	124
6.3	Warmzugversuche.....	125
6.3.1	Parameterfeld der Dehngeschwindigkeiten	125
6.3.2	Versuchsaufbau/-durchführung	126
6.3.3	Spannungs-Dehnungs-Verläufe	127
6.3.4	Effekte in Abhängigkeit der Temperatur	131

6.4	Elastizitäts- und Schubmodul	134
6.4.1	Theoretische Grundlagen	135
6.4.2	Dynamischer Elastizitätsmodul	137
6.4.3	Dynamischer Schubmodul	138
6.5	Querkontraktionszahl (<i>Poisson-Zahl</i>)	139
6.6	Wärmeausdehnungskoeffizient	140
6.7	Dichte	141
6.8	Spezifischer elektrischer Widerstand	142
6.9	Wärmeleitfähigkeit	143
6.10	Spezifische Wärmekapazität	145
6.11	Quasi-Isotropie des Werkstoffes	146

Kapitel 7

Numerische Simulation des Schweißprozesses.....	147
7.1 Allgemeine Vorgehensweise	147
7.2 Abbildung des transienten Temperaturfeldes.....	150
7.2.1 Geometrie und Diskretisierung.....	150
7.2.2 Werkstoffmodellierung	151
7.2.3 Thermische Randbedingungen	157
7.2.3.1 Wärmeübergangskoeffizient Konvektion.....	158
7.2.3.2 Wärmeübergangskoeffizient Strahlung	160
7.2.4 Simulation des Schweißlichtbogens.....	161
7.2.5 Aufbringen der thermischen Belastung und Lösung.....	167
7.2.6 Vergleich Simulation und Messung	168
7.3 Strukturmechanische Berechnung	172
7.3.1 Allgemeine Voraussetzungen.....	172
7.3.2 Mechanische Randbedingungen.....	172
7.3.3 Aufbringen der Belastung und Lösung	173
7.3.4 Darstellung der Simulationsergebnisse.....	174
7.4 Schlussfolgerungen.....	183

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick	185
---	------------

Literatur	1
------------------------	----------

Anlagen	1
----------------------	----------

Nomenklatur

Große lateinische Buchstaben

Zeichen	Bedeutung	SI-Einheit
A	Fläche	m^2
A_{Sp}	Gesamtsplattfläche	cm^2
A_{Dr}	Querschnittsfläche Schweißdraht	cm^2
C	Wärmekapazität	J/K
C_p	Wärmekapazität unter konstantem Druck	J/K
E	Elastizitätsmodul	N/mm^2 , N/m^2
ΔE	Energiedifferenz	W
G	Schubmodul	N/mm^2 , N/m^2
Gr	Grashof-Zahl	---
H	Enthalpie	J
I	Schweißstrom	A
KE	Kinematische Energie	J
Nu	Nusselt-Zahl	---
PE	Potentielle Energie	J
Pr	Prandtl-Zahl	---
\dot{Q}	Wärmestrom infolge Lichtbogen	W
Ra	Rayleigh-Zahl	---
T	Temperatur	$^{\circ}\text{C}$, K
T_0	Absoluttemperatur des Fluids	K
ΔT	Temperaturdifferenz Fluid/Bauteil	K
U	Schweißspannung	V
U	Innere Energie	J
V	Volumen	m^3

Kleine lateinische Buchstaben

Zeichen	Bedeutung	SI-Einheit
a	Temperaturleitfähigkeit des Fluids	m^2/s
c	spezifische Wärmekapazität	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
c	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
$d_{(T)}$	Dichte in Abhängigkeit der Temperatur T	kg/m^3
$d_{(20)}$	Dichte bei einer Temperatur von 20 $^{\circ}\text{C}$	kg/m^3
f	Frequenz	Hz
f_p	Frequenz der Schwingung in der Probe	Hz

f_f	Wichtungsfaktor Wärmeleistung Wärmequelle front	---
f_r	Wichtungsfaktor Wärmeleistung Wärmequelle rear	---
g	Erdbeschleunigung von 9,81	m/s^2
h	spezifische Enthalpie	kJ/kg
h_{Lat}	Latente Wärme (Enthalpiesprung)	kJ/kg
h_v	spezifische Entahlpie (Volumen)	kJ/m^3
l	Probenlänge	m
ℓ	Überströmlänge der kürzeren Plattenseite	m
M	Masse	kg
n_b	Nahtraubenbreite	cm
$n_{\text{ü}}$	Nahtüberhöhung	cm
p	Ordnungszahl der Schwingung	---
p	Druck	N/m^2
\dot{q}	Wärmestromdichte	W/m^2
q^B	Wärmemenge pro Volumeneinheit	W/m^3
q_{vol}	Wärmestomdichte (Volumenwärmequelle)	W/m^3
w_b	Wurzelbreite	cm
$w_{\text{ü}}$	Wurzelüberhöhung	cm
v_{Dr}	Drahtfördergeschwindigkeit	m/min
v_l	Schallgeschwindigkeit in longitudinaler Richtung	m/sec
v_m	Schallgeschwindigkeit im Medium	m/sec
v_S	Schweißgeschwindigkeit	m/min
v_{tor}	Schallgeschwindigkeit in torsonaler Richtung	m/sec
$x_{0,05}$	Achsabschnitt Goldak-Wärmequelle bei 5% Wärmestromdichte	m
$y_{0,05}$	Achsabschnitt Goldak-Wärmequelle bei 5% Wärmestromdichte	m
$z_{0,05}$	Achsabschnitt Goldak-Wärmequelle bei 5% Wärmestromdichte	m

Griechische Buchstaben

Zeichen	Bedeutung	SI-Einheit
α	Wärmeübergangskoeffizient	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
α_K	Wärmeübergangskoeffizient Anteil Konvektion	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
α_S	Wärmeübergangskoeffizient Anteil Strahlung	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
α	Wärmeausdehnungskoeffizient	$1/\text{K}$
α_n	Nahtöffnungswinkel	Grad
α_w	Wurzelöffnungswinkel	Grad
β	räumlicher Wärmeausdehnungskoeffizient	$1/\text{K}$
ε	Emissionsgrad Strahlung	---
η	Wirkungsgrad	---
λ	Wärmeleitfähigkeit	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
λ_m	Wellenlänge der Schwingung im Medium	m

ν	kinematische Viskosität	m^2/s
ρ	Dichte	kg/m^3
$\rho(T)$	Elektrischer Widerstand in Abhängigkeit der Temperatur	$\mu\Omega\text{m}$
ρ_0	Elektrischer Restwiderstand (Gitterbaufehler, Verunreinigung)	$\mu\Omega\text{m}$
$\rho_G(T)$	Elektrischer Widerstand durch Atomrumpfschwingung	$\mu\Omega\text{m}$
σ	Spannung	N/mm^2
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante = $5,67 \cdot 10^{-8}$	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
ϑ	Temperatur	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$
ϑ_B	Oberflächentemperatur Bauteil	K
ϑ_F	Temperatur des umgebenden Fluids	K

Kapitel 1

Einführung

1.1 Problemstellung, Motivation und Stand der Technik

Erhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen an Bauwerken werden in unmittelbarer Zukunft an erheblicher Bedeutung gewinnen. Bereits heute übersteigen in Deutschland die Investitionen für den Erhalt und/oder die Verstärkung bestehender Bausubstanz die Neubauinvestitionen. Nutzung und Beanspruchung eines Bauwerkes sind keine unveränderlichen Größen und unterliegen zeitlichen Veränderungen. Eingriffe in die Tragstruktur der Konstruktion sind somit in der Regel unvermeidlich. Bei den notwendigen Verstärkungs- oder Sanierungsmaßnahmen ist es im Allgemeinen wirtschaftlich entscheidend, ob an einer unter Last stehenden Konstruktion geschweißt werden kann, oder ob eine Entlastung der Konstruktion vorgenommen werden muss. Bis heute wird davon ausgegangen, dass unter Lastbeanspruchung, insbesondere unter veränderlicher Last – wie z.B. im Brücken- und Offshorebau – nicht geschweißt werden darf. Für den Fall einer Sanierungs- oder Verstärkungsschweißung im Brückenbau, bedeutet dies eine Sperrung des Bauwerks, was zu Verkehrsbehinderung und somit wirtschaftlichen Einbußen führt. Andererseits gibt es Bauwerke, deren äußere Beanspruchung nicht verhindert werden kann. Hierzu gehören alle Bauwerke die Wind- und/oder Welleneinwirkung ausgesetzt sind, wie z.B. Türme und Masten, Offshore-Anlagen etc. Reparatur- und Instandsetzungsarbeiten müssen hier unter einer veränderlichen Belastung der Konstruktion durchgeführt werden.

Die Sanierung bzw. Umgestaltung/-nutzung bestehender Bauwerke des Hochbaus führt häufig zu dem Wunsch, größere Nutzlasten gegenüber dem Ursprungsentwurf zuzulassen. Bauliche Maßnahmen an einer bestehenden Konstruktion haben somit das Ziel, die unter statischer Beanspruchung stehenden Tragelemente, wie z.B. Stützen und Unterzüge, durch Verstärkungsmaßnahmen zu ertüchtigen. Von PASTERNAK [1995] und HÜNERSEN [1987, 1992] durchgeführte Untersuchungen zeigen, dass Schweißungen im Rahmen einer Verstärkungsmaßnahme, z.B. dem Aufschweißen von Stahllaschen an druckbeanspruchten Stützen, grundsätzlich möglich sind. Durch den Schweißprozess auftretende lokale Änderungen des E-Moduls und der Streckgrenze sowie die Entstehung von Schweißeigenspannungen wirken sich auf das Tragverhalten der betroffenen Konstruktionselemente und damit auf das Tragwerk aus. Nahtflankenbewegungen während des Schweißens treten aufgrund der rein statischen Beanspruchung nicht auf. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen letztlich, dass für jeden Verstärkungsfall eine

individuelle Berechnung bezüglich der Auswirkungen des Schweißens erforderlich ist, um das Tragverhalten ausreichend genau zu erfassen.

Neben der Umgestaltung und Verstärkung von Konstruktionen, die einer reinen statischen Beanspruchung unterliegen, kommt der Ertüchtigung oder Reparatur dynamisch beanspruchter Bauwerke eine besondere Bedeutung zu. Mit dem Vorliegen einer dynamischen Beanspruchung, z.B. durch Verkehr, Wind oder Welle, unterliegt das zu verstärkende Bauteil einer wechselnden Kraft- und damit Spannungsbeanspruchung. Die auftretenden Verformungen sind nicht länger eine konstante Größe, sondern unterliegen einer Schwankungsbreite. Infolge der zeitlich variablen Dehnungen treten Relativverschiebungen zwischen dem zu verstärkenden Bauteil und dem zunächst spannungsfreien Verstärkungselement auf. Das Gesamttragverhalten bestimmt sich durch den lokalen Einfluss des Schweißprozesses auf die Materialeigenschaften des zu verstärkenden Bauteils sowie durch die Auswirkungen der Nahtflankenbewegungen auf die Nahtgüte und damit den Lasteintrag in das Verstärkungselement. Untersuchungen zu den Auswirkungen auf die Tragfähigkeit sowie Dauerhaftigkeit von Schweißverbindungen bei Bauteilen, die unter wechselnder Beanspruchung während des Schweißprozesses stehen, liegen derzeit nicht vor. Typische Beispiele für Notwendigkeit näherer Untersuchungen stellen Verstärkungsmaßnahmen an Brücken, Masten und Offshore-Bauwerken aufgrund ihrer dynamischen Beanspruchung dar, welche bestenfalls minimiert, jedoch nie vollständig verhindert werden kann.

Die bisher vorgestellten Überlegungen gehen von einer Verstärkung oder Instandsetzung an bestehenden Strukturen aus. Ein weiteres Anwendungsfeld stellt das Fügen einzelner Konstruktions- oder Bauabschnitte zu einem Gesamttragwerk dar, z.B. im Brückenbau oder Offshore-Bereich. Im Vorwege der Verbindung liegen die einzelnen Bauteile als eigenständige Tragwerke vor, wodurch jedes Bauteil individuell beansprucht wird. Erfolgt die Beanspruchung dynamisch, z.B. durch Verkehr, Wind oder Welle, verhalten sich die Einzelteile, aufgrund unterschiedlicher Beanspruchung und Steifigkeit, in ihrer Verformung unabhängig voneinander. Es treten Relativverschiebungen der Bauteile zueinander auf, wodurch der Schweißnahtspalt einer ständigen Veränderung unterliegt. Ein Verschweißen der einzelnen Bauteilsegmente ist, nach dem bisherigen Stand des Wissens und der Forschung, jedoch erst nach einer Fixierung der Bauteile in Ihrer Lage zueinander zulässig. Bei der Errichtung von Brückenbauwerken bedeutet dies, dass im Vorwege der Verbindungsschweißung einzelner Brückensegmente, bereits für den Verkehr freigegebene Abschnitte wieder gesperrt werden müssen, um einen dynamischen Lasteintrag und somit eine Verschiebung der Brückenteile zueinander auszuschließen. In Folge dieser notwendigen Maßnahmen kommt es zu einem Nutzungsausfall der Konstruktion, welche im Falle einer Brückensperrung mit erheblichen wirtschaftlichen Einbußen verbunden ist.

Mitte der achtziger Jahre wurden in Japan erste Untersuchungen zur Machbarkeit von Schweißverbindungen bei sich bewegenden Nahtflanken, im *folgenden Schweißen unter Betriebsbeanspruchung* genannt, durchgeführt. Grund der Forschung war die steigende Notwendigkeit der Instandsetzung von Stahlbrücken, für die – bedingt durch ein hohes Verkehrsaufkommen – eine Sperrung nicht vertretbar war. Untersuchungen

von NAKANISHI et. al. [1985, 1987] zeigen, dass eine Schweißung unter einachsiger dynamischer Beanspruchung bei sich bewegendem Nahtflanken mit Einschränkungen möglich ist. Es wurde festgestellt, dass die unter Betriebsbeanspruchung hergestellten Schweißnähte in Abhängigkeit von der dynamischen Beanspruchung Heiß- und Erstarrungsrisse im Schweißgut aufwiesen. Weiterführende Untersuchungen zielten daher auf die Entwicklung von speziellen Stabelektroden zur Herabsetzung der Heißrissempfindlichkeit des Schweißgutes beim Schweißen unter Betriebsbeanspruchung ab.

Analog zu den Reparaturschweißungen bei Brückenbauwerken besteht die Notwendigkeit, Instandsetzungsmaßnahmen an meerestechnischen Konstruktionen durchzuführen, ohne dass diese in ihrer Nutzung beschränkt werden. Im Rahmen der DFG-Forschergruppe *Schadensforschung und Schadensbeseitigung an Stahlkonstruktionen im Wasser*, wurden Anfang der neunziger Jahre von VALTINAT und ANSORGE [1995] Untersuchungen an Großrohren durchgeführt, welche unter Betriebsbeanspruchung verschweißt wurden. Im Rahmen der durchgeführten Versuche konnte festgestellt werden, dass die hergestellten Schweißnähte Risse im Wurzelbereich aufweisen. Aufgrund der hohen Kosten für die Versuchsdurchführung an Großrohren, wurden im Verlauf des Forschungsprojektes weitere Untersuchungen an Flachblechproben durchgeführt, welche zu den Großrohren vergleichbare Ergebnisse lieferten. Alle gemachten Untersuchungen wurden für eine Öffnungsamplituden des Schweißnahtspaltes von $\pm 0,25$ mm bei einer Frequenz von 1 Hz durchgeführt.

Die von VALTINAT und ANSORGE vorgestellten Ergebnisse belegen die Möglichkeit der Herstellung nutzbarer Schweißverbindungen unter Betriebsbeanspruchungen, gestatten jedoch keine Aussagen hinsichtlich der Abhängigkeiten bei unterschiedlichen Spaltöffnungsamplituden und Frequenzen. Im Verlauf weiterer Forschung, wurde von SCHIEBEL [1998] das Parameterfeld auf Frequenzen von 0,25 Hz bis 1,0 Hz und Spaltöffnungsamplituden von $\pm 0,25$ mm bis $\pm 0,75$ mm erweitert. Das Ergebnis dieser Untersuchungen belegte die Abhängigkeit der Beanspruchbarkeit der unter Betriebsbeanspruchung hergestellten Schweißverbindungen, hinsichtlich der einwirkenden Spaltöffnungsamplitude sowie der vorherrschenden Frequenz. Genaue Aussagen zur statischen Beanspruchbarkeit von Schweißnähten, welche unter Betriebsbeanspruchung hergestellt wurden, liegen auch mit Abschluss der aufgeführten Untersuchungen nicht vor.

Schadensfälle der Gegenwart bzw. jüngsten Vergangenheit belegen die Notwendigkeit ein kostengünstiges Reparaturverfahren für Stahlkonstruktionen bereitzustellen, welches ein Fügen von Bauteilen unter dynamischer Beanspruchung, d.h. bei gleichzeitiger Bewegung der Schweißnahtflanken, erlaubt. Beispielhaft ist die Sanierung der in Abb. 1.2 dargestellten Stabbogenbrücke Dömitz zu nennen. Infolge Regen-Wind induzierter Schwingungen kam es bereits ein Jahr nach Fertigstellung der Brücke zu Anrissen im unteren Anschlussbereich der Brückenhänger, siehe Abb. 1.1. Anfängliche Überlegungen eine Instandsetzung der Brückenhänger unter Beibehaltung der Verkehrsbeanspruchung durchzuführen, wurden aufgrund der sich öffnenden und schließenden Rissflanken verworfen, da gesicherte Kenntnisse über die Tragfähigkeit einer unter Betriebsbeanspruchung erstellten Schweißnaht nicht vorlagen. Um eine Repara-



Abb. 1.1 Elbbrücke Dömitz



Abb. 1.2 Anriss Brückenhänger der Brücke Dömitz

tur der Brückenhänger zu ermöglichen, war deren konstruktiv aufwendige Entlastung, verbunden mit einer Sperrung der Brücke für den Straßenverkehr, unumgänglich. Die Nachkalkulation der durchgeführten Sanierungsmaßnahme ergab, dass über 95% der angefallenen Kosten aus den Einrüstarbeiten zur Entlastung der Brückenhänger resultierten.

Es bleibt abschließend festzustellen, dass Erkenntnisse über die Auswirkungen von Schweißarbeiten auf das Tragverhalten einer unter Beanspruchung stehenden Konstruktion nur sehr unzureichend vorliegen und zum Teil Gegenstand der derzeitiger Forschung sind. Eine Aussage über die erzielbare Schweißnahtqualität einer unter Betriebsbeanspruchung hergestellten Schweißnaht ist nur sehr begrenzt möglich. Richtlinien oder Regelungen, die ein Verschweißen von Bauteilen unter Betriebsbeanspruchungen erlauben und regeln, existieren zurzeit nicht. Die vorangestellten Ausführungen verdeutlichen somit auch das technische und wirtschaftliche Potential, welches in der Möglichkeit des Schweißens unter Betriebsbeanspruchung für das zukünftige Bauen steckt.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit ist die Untersuchung und Bewertung von Schweißverbindungen an Baustählen S355J2G3, welche unter Betriebsbeanspruchung, d.h. unter Bewegung der Nahtflanken, verschweißt wurden. Aufbauend auf den durchgeführten Schweißversuchen werden Randbedingungen und Grenzen zur technisch sinnvollen Machbarkeit derartiger Schweißverbindungen vorgestellt. Vorrangiges Ziel bildet die Schaffung von Beurteilungskriterien, welche den planenden Ingenieur in die Lage versetzen, eine Aussage über die statische Tragfähigkeit einer unter Betriebsbeanspruchung hergestellten Schweißnaht zu treffen. Eine Beurteilung hinsichtlich der Lebensdauer derartiger Schweißverbindungen steht nicht im Vordergrund der Untersuchung und ist Ziel weiterer Forschung. Theoretische Untersuchungen mittels der FE-Methode sollen eine Prognose über die Wärme- und Spannungsverteilung im Bauteil während und nach der Schweißung erlauben.



Abb. 1.3 Ablaufplan des Forschungsvorhabens „Schweißen unter Betriebsbeanspruchung“

Zum Erreichen der gesetzten Ziele wurden sowohl theoretische als auch experimentelle Untersuchungen durchgeführt und zur Verifikation gegenübergestellt. Der Ablauf der durchgeführten Forschungsarbeiten ist der Abb. 1.3 zu entnehmen.

Ausgehend von den Forschungsergebnissen an MAG-Schweißungen von SCHIEBEL [1998] und VALTINAT/ANSORGE [1995], soll untersucht werden, wie sich Spaltöffnungsamplitude und Frequenz auf die mechanischen Eigenschaften einer unter Betriebsbeanspruchung geschweißten Naht auswirken bzw. innerhalb welcher Grenzen eine technisch sinnvolle Schweißung möglich ist. Die von SCHIEBEL durchgeführten Untersuchungen an einem Baustahl S355JR erstrecken sich auf jeweils drei Frequenzen (0,25 Hz, 0,5 Hz und 1,0 Hz) und Spaltöffnungsamplituden ($\pm 0,25$ mm, $\pm 0,5$ mm und $\pm 0,75$ mm), wobei die beiden Extremalkombinationen (1,0 Hz / $\pm 0,75$ mm und 0,25 Hz / $\pm 0,25$ mm) nicht untersucht worden sind. Das sich daraus ergebende kleine Parameterfeld von 7 Schweißversuchen kann nicht voll befriedigen. Es stellt ein zu grobes Raster dar, um eine Aussage über die Machbarkeit einer Schweißung unter Betriebsbeanspruchung zu erlauben. Als problematisch ist auch die händische Durchführung der Schweißversuche anzusehen, da eine direkte Zuordnung von Ursache und Wirkung aufgrund der menschlichen Streugröße nicht möglich scheint. Zur Erlangung aussagekräftiger und reproduzierbarer Ergebnisse ist es daher unumgänglich, das Parameterfeld zu verfeinern bzw. auszuweiten und die Versuchsdurchführung zu automatisieren.

Der erste Themenbereich der Arbeit beschäftigt sich daher zunächst mit der Planung und dem Bau eines automatisierten Schweißversuchsstandes. Anhand eines vorgegeben Anforderungsprofils wird das Konstruktionsprinzip sowie die steuer- und regelungstechnische Einbindung der entwickelten Zweiachsenprüfmaschine in die Anlagenelektronik vorgestellt. Einzelne Anlagenteile und Komponenten werden, soweit für das Verständnis des Funktionsprinzips notwendig, ausführlich erläutert.

Grundlage der experimentellen Forschung bilden zunächst Einlagen-Schweißversuche sowie Schweißversuche an gekerbten Versuchskörpern aus Baustahl S355J2G3. Durchführung und Auswertung der Versuchsreihen werden im zweiten Themenabschnitt dieser Arbeit vorgestellt. Ausgehend von einer Darstellung des umfangreichen Versuchsprogramms, werden die Ergebnisse der durchgeführten Versuchsschweißungen unter einachsiger Beanspruchung bei zunächst vollständiger Trennung der Probenbleche dargestellt. Der Einfluss von Spaltöffnungsamplitude und Bewegungsfrequenz auf die zu erzielende Nahtgüte wird diskutiert und die Grenzen der technisch sinnvollen Schweißung aufgezeigt. Punktuell durchgeführte Temperaturmessungen im Bereich der Schweißnaht dienen der späteren Verifikation der numerischen Schweißsimulation.

Ein Vergleich der Tragfähigkeiten zwischen in Ruhe und unter Nahtflankenbewegung hergestellten Schweißverbindungen ist Gegenstand des dritten Themenabschnittes. Basierend auf durchgeführten Zugversuchen werden die Tragfähigkeiten der einzelnen Schweißverbindungen, welche unter verschiedenen Randparametern hergestellt worden sind, bestimmt. Durch Entnahme der Zugproben über die Schweißnahtlänge erfolgt eine Aussage zur Tragfähigkeit über die Probenbreite, welche zusätzlich als Indikator für die Qualität der Versuchseinrichtung dient. Die sich aus den Zugversuchen

darstellenden Ergebnisse werden den Ergebnissen von Zugproben aus Referenzschweißungen, welche unter Ausschluss einer Nahtflankenbewegung hergestellt worden sind, gegenübergestellt und bewertet. Angaben zur Duktilität und Versagensform bilden den Abschluss der mechanischen Untersuchungen.

Ursächlich für das Auftreten von Heißbrissen in der Schweißnahtmitte sind die während des Schweißprozesses auftretenden Zugbeanspruchungen im erstarrenden Schweißgut (siehe z.B. [NAKA 1985, 1987, SCHI 1998, VALT 1999]). Der vierte Themenabschnitt befasst sich deshalb mit der Identifizierung der Risse mit Hilfe der metallurgischen Analyse der Schweißnähte. Die lichtmikroskopischen Untersuchungen an den unter Betriebsbeanspruchungen geschweißten Proben dienen der Beurteilung der Auswirkung der äußeren Beanspruchung während des Schweißprozesses auf die Gefügestruktur der Schweißnaht bzw. des Grundmaterials. Möglichkeiten der Heißbrissvermeidung bzw. Minimierung bei konventioneller Schweißung werden diskutiert und vorgestellt.

Die numerische Abbildung des Schweißprozesses sowie die Ermittlung der dazu benötigten temperaturabhängigen Werkstoffkennwerte sind Gegenstand des fünften und sechsten Themenbereiches. Grundlage der numerischen Berechnung sind die bekannten Gleichungen der Wärmelehre bzw. Strukturmechanik. Zur Sicherstellung realistischer Ergebnisse bedarf es neben einer ausreichenden Beschreibung des Schweißprozesses (Wärmeeinbringung), der Bauteilstruktur sowie der Lasteinwirkung, insbesondere auch der genauen Kenntnis des temperaturabhängigen Werkstoffverhaltens [Radaj 1999]. Mangelndes Wissen, um das physikalische, mechanische Materialverhalten von Baustahl im Hochtemperaturbereich, stellt sich in zahlreichen wissenschaftlichen Arbeiten als Problem dar [PITTER 1992, WEIß 1994, HAMA 1996, SCHI 1998, LIND 1999, MEHM 2003 u. v. M.]. Die Bestimmung und Ergänzung der temperaturabhängigen Materialkennwerte von Baustahl S355J2G3 wird daher als fundamental erachtet und ist deshalb auch ein Nebenziel der vorliegenden Arbeit.

Aufbauend auf den Ergebnissen der werkstoffkundlichen Untersuchungen erfolgt dann die numerische Abbildung des Schweißprozesses mittels der FE-Methode. Die numerische Simulation stellt sich als einsinniges Temperatur-Struktur-Kopplungsproblem (Multiphysik-Aufgabe) dar [MÜLL 2000, GROTH 2001]. Grundlage der numerischen Analyse bildet die rechnerische Bestimmung des transienten Temperaturfeldes unter Einwirkung des Schweißlichtbogens. Nach Abschluss dieser Berechnung erfolgt eine Übertragung des transienten Temperaturfeldes auf das strukturmechanische Modell und die Ermittlung der transienten Spannungsverteilung im Bauteil.

Kapitel 2

Entwicklung eines Zwei-Achsen-Prüfrahmens

2.1 Anforderungen an den Versuchsaufbau

Zur Verifizierung der theoretischer Überlegungen bzw. der numerischer Simulationen ist die Durchführung von Schweißversuchen im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit unerlässlich. Die Erlangung aussagekräftiger und reproduzierbarer Ergebnisse zur Beurteilung eines Sachverhaltes ist somit das Ziel jeder experimentellen Untersuchung. Um dieses Ziel sicher zu erreichen, muss eine Versuchplanung bzw. -durchführung auf eine Minimierung auftretender Störgrößen ausgelegt sein. Störgrößen stellen eine Beeinflussung des Versuchsergebnisses dar und könnten im ungünstigsten Fall zu fehlerhaften Ergebnissen oder Beurteilungen führen. Abweichungen vom Optimum eines Ergebnisses beruhen stets auf dem *gleichzeitigen* Einwirken einer meist sehr *großen* Anzahl verschiedenartiger Störgrößen. Nach PAPULA [2001] lassen sich die einer Störung zugrunde liegenden Einflüsse unterteilen:

- *Unvollkommenheit* der verwendeten Messinstrumente, der zugrunde liegenden Messmethode und des Messobjektes
- *Umwelteinflüsse*, wie z.B. geringfügige Schwankungen der Temperatur, des Luftdrucks und der Luftfeuchtigkeit oder das Einwirken elektromagnetischer Felder
- Einflüsse, die mit der *Person* des Beobachters oder Versuchsdurchführenden verbunden sind, wie z.B. die Tagesform des Schweißers

Einflüsse aus Unvollkommenheit bzw. Umwelteinfluss lassen sich durch eine detaillierte Versuchsplanung und redundante Bauweise des Versuchstandes auf ein Minimum beschränken. So können z.B. elektromagnetische Felder aus dem Schweißprozess abgeschirmt und Wegmessungen zur Datenerfassung bzw. Steuerung durch Verdopplung und Abgleich der Sensoren untereinander, unempfindlicher gegenüber auftretenden Unwägbarkeiten gestaltet werden. Hauptfehlerquelle bleibt jedoch, aufgrund mangelnder Kontinuität und Reproduzierbarkeit, der Mensch. Dies gilt insbesondere für Durchführung von Schweißarbeiten, welche im Stahlhoch- und Ingenieurbau, aufgrund der

sich ständig ändernden Bauteilgeometrien vorrangig manuell ausgeführt werden. D. h. die Ausführung und Qualität der Schweißarbeit ist abhängig vom händischen Geschick und der Tagesform des Schweißers. Aus dieser Betrachtung folgt, dass im Rahmen einer wissenschaftlichen Untersuchung über die Auswirkungen einer Nahtflankenbewegung auf die Schweißnahtqualität die durchzuführenden Versuchsschweißungen automatisiert erfolgen müssen, soll die Störgröße „Mensch“ nicht in das Versuchsergebnis einfließen.

Für die Umsetzung der automatisierten Schweißdurchführung muss das zur Anwendung kommende Schweißverfahren eine Automatisierung erlauben. In Anlehnung an die in der Praxis verwendeten Schweißverfahren wurde entschieden, dass mittels Schweißroboter (Knickarmroboter) automatisierte **Metall-Aktiv-Gas-Schweißen** (MAG) für die Versuchsschweißungen einzusetzen und in den Versuchsaufbau steuerungstechnisch zu integrieren.

Die versuchstechnische Umsetzung der translatorischen Nahtflankenbewegung während des Schweißprozesses stellt die größte Herausforderung bei der Errichtung des Versuchsstandes dar. Anforderungen hinsichtlich der Größe und Richtung der Prüfkörperbewegung relativ zueinander sowie der Bewegungsfrequenz müssen festgelegt und mit den technischen Möglichkeiten am Institut abgeglichen werden. Basierend auf den durchgeführten Versuchen von NAKANISHI ET. AL. [1985], VALTINAT [1995] und SCHIEBEL [1998] wurde die maximale Bewegungsamplitude mit $\pm 2,0$ mm und die maximale Bewegungsfrequenz mit 25 Hz festgelegt. Bei der Planung zu berücksichtigen ist die sich aus der gewählten Probenkörpergeometrie und der aufzubringenden Bewegungsamplitude ergebende Kraft, von 900 kN. Diese sich während des geplanten Versuchsablaufes im ungünstigsten Fall darstellende Kraft hat einen direkten Einfluss auf die Auslegung der erforderlichen hydraulischen Komponenten zur Aufbringung der Probenbeanspruchung. Die weitere Forderung nach einer Bewegung der Nahtflanken längs und/oder quer zur Schweißrichtung bedingt eine Ausstattung des Versuchsstands mit zwei hydraulischen Lastachsen, welche unabhängig von einander angesteuert werden können. Aufgrund der sehr kleinen Prüfwege kommt der Aufnahme und Lagerung der Schweißproben eine besondere Bedeutung zu. Die Gestaltung der Probenaufnahme soll einen zügigen Probenein- und Ausbau bei gleichzeitiger Spielfreiheit der Probenlagerung gewährleisten und eine Verdrehung der Probe während des Schweißprozesses ausschließen. Diese Forderung bedingt eine präzise mechanische Führung der Probenlager sowie eine enge Toleranz bei der Fertigung der Versuchseinrichtung, sollen Effekte aus Verformung oder Schlupf der Konstruktionselemente, das Versuchsergebnis nicht beeinflussen.

Neben den dargestellten Anforderungen an den Versuchstand sowie der Sicherstellung gleich bleibender Schweißnahtqualitäten, muss bei der Planung Berücksichtigung finden, dass eine manuelle Versuchssteuerung bzw. eine partiell von Hand gestartete Messdatenerfassung einen direkten Vergleich einzelner Versuche untereinander erschwert. Auswirkungen auf die Versuchsausgangsbedingungen sind in letzter Konsequenz nicht gänzlich vermeidbar. Als globale Anforderung an den Versuchsaufbau muss daher die Forderung einer vollautomatisierten Versuchsdurchführung mit gleich-

zeitiger Messwerterfassung gestellt werden. Das Stichwort der *Einknopfbedienung* spiegelt den geforderten Sachverhalt zutreffend wider. Mit Abschluss des Probeneinbaus in den Versuchsaufbau sowie der Programmierung aller notwendigen Komponenten (Hydraulik, Schweißgerät, Roboter), erfolgt nach Betätigung des „Startknopfes“, die automatische und autonome Durchführung des Schweißversuches inklusive der Versuchsdatenerfassung. Störgrößen durch menschliche Unzulänglichkeiten können sich nur auf die Programmierung der Versuchsanlage erstrecken, nicht jedoch auf die eigentliche Versuchsdurchführung. Um eine direkte Zuordnung zwischen Ursache und Wirkung zu ermöglichen, ist eine realtime Datenerfassung mit ausreichend hoher Abtastrate erforderlich. Die aufgenommenen Messdaten müssen zentral erfasst, in eine chronologische Reihenfolge gebracht und abgespeichert werden, wobei die Zuordnung eines Masterzeitindex zu den einzelnen aufgenommenen Datensätzen für die spätere Auswertung von entscheidender Bedeutung ist. Erst anhand des Zeitindex besteht die Möglichkeit, eine Aussage zur vorherrschenden Situation, zu einem beliebigen Zeitpunkt während des Schweißprozesses, zu treffen. Die Qualität der Aussage bestimmt sich durch die Forderung nach einer ausreichend hohen Abtastrate der Sensorik. Das Erfassen von Vorgängen beim Schweißprozess, welche innerhalb von Bruchteilen einer zehntel bis hundertstel Sekunde ablaufen, wie z.B. Strom- und Spannungsschwankungen beim kurzschlussbehafteten Tropfenübergang, bedingt höchste Abtastraten bei der Datenaufzeichnung.

Abschließend sollte die Planung bzw. Entwicklung eines Versuchsstandes dem Umstand der zeitlichen Nutzung sowie möglicher Veränderungen der Versuchsdurchführung oder Forschungsinteressen Rechnung tragen. Forschungsschwerpunkte oder Forschungsinteressen können sich im Verlauf der Zeit, z.B. aufgrund von neuen Erkenntnissen, verändern. Dies gilt insbesondere bei langfristigen Forschungsvorhaben.

2.2 Konstruktion und Ausführung

2.2.1 Übersicht und Funktionsprinzip

Basierend auf den im Abschnitt 2.1 vorgestellten Anforderungen an den Versuchsaufbau bzw. an die Versuchsdurchführung, wurde ein Zwei-Achsen-Prüfstand entwickelt, welcher eine vollautomatisierte Versuchsdurchführung mittels MAG-Roboterschweißung erlaubt. Der Versuchsaufbau, dargestellt in Abbildung 2.1, besteht im Wesentlichen aus sechs Baugruppen (Schweißroboter, Schweißstromquelle, Hydraulikregelung, Masterrechner, Messkarten, Zwei-Achsen-Prüfrahmen), welche zum Zwecke des Datenaustausches und der Steuerung vernetzt sind.

Den Mittelpunkt der Versuchsanordnung bildet eine servohydraulische Zwei-Achsen-Prüfmaschine. Die Beanspruchung der Schweißproben erfolgt über Servo-Hydraulikzylinder, welche an das zentrale 280 bar Hydrauliksystem des Instituts angeschlossen sind und eine maximale Kraftbeaufschlagung von 850 kN (Zug) bzw. 1250 kN (Druck) ermöglichen. Zur Lenkung der Hydraulikölströme sowie zur Abpufferung von Leistungsspitzen und Rückschlägen werden modifizierte hydraulische Anschlußeinheiten (**Hydraulic-Service-Manifold**, Konstruktionsprinzip der Firma MTS) eingesetzt, welche zwischen der zentralen Hydraulikversorgung und den Hydraulikzylindern der Prüfmaschine angeordnet sind. Für die Lagerung der Versuchskörper wurden spezielle Lagerschlitten entwickelt, welche mit Passbolzen versehen eine spielfreie mechanische Fixierung der Probenbleche ermöglichen. Um eine nahezu reibungsfreie Führung der Lagerschlitten zu gewährleisten, werden vorgespannte Rollenschienführungen eingesetzt, welche auch zur Aufnahme etwaiger Exzentrizitäten und Kräfte aus dem Versuch dienen.

Die Steuerung der Zylinderbewegung erfolgt durch Servoventile, die wiederum durch das Regelprogramm der MTS-Testar II^m-Regelung angesprochen werden. Über einen mit der MTS-Testar II^m-Regelung verbundenen PC können Beanspruchungsverläufe in Kraft- oder Wegregelung programmiert und während des Versuches überwacht werden. Angaben zur Lageposition der Probe bzw. Kraftbeanspruchung werden mittels Weg- und Kraftsensoren direkt an die Regelung geleitet, so dass eine unerwünschte Veränderung erkannt und ausgeglichen wird.

Das Abschweißen der Versuchskörper erfolgt vollautomatisch mittels eines Schweißroboters. Anwendung findet ein Standard-Industrieroboter KR 6[®] der Firma KUKA, welcher mit einer Schweißeinheit der Firma Fronius ausgestattet ist. Als Schweißverfahren kommt das MAG-Verfahren zum Einsatz, da es ein praxisübliches Schweißverfahren darstellt, welches eine Automatisierung gestattet. Bei der verwendeten Schweißstromquelle vom Typ Synergic 5000[®] handelt es sich um eine Inverterstromquelle der neuesten Generation, welche den Einsatz der Impulslichtbogen-Technik zum Verschweißen der Bleche erlaubt. Über eine angeschlossene Steuereinheit vom Typ RCU 5000[®] ist eine benutzerdefinierte Modifikation sämtlicher Schweißparameter und Kennlinien möglich. Zur Steuerung der Bahnbewegungen des Roboters bzw. zur Ansteuerung der Schweißstromquelle wurde die übliche Standardsoftware des

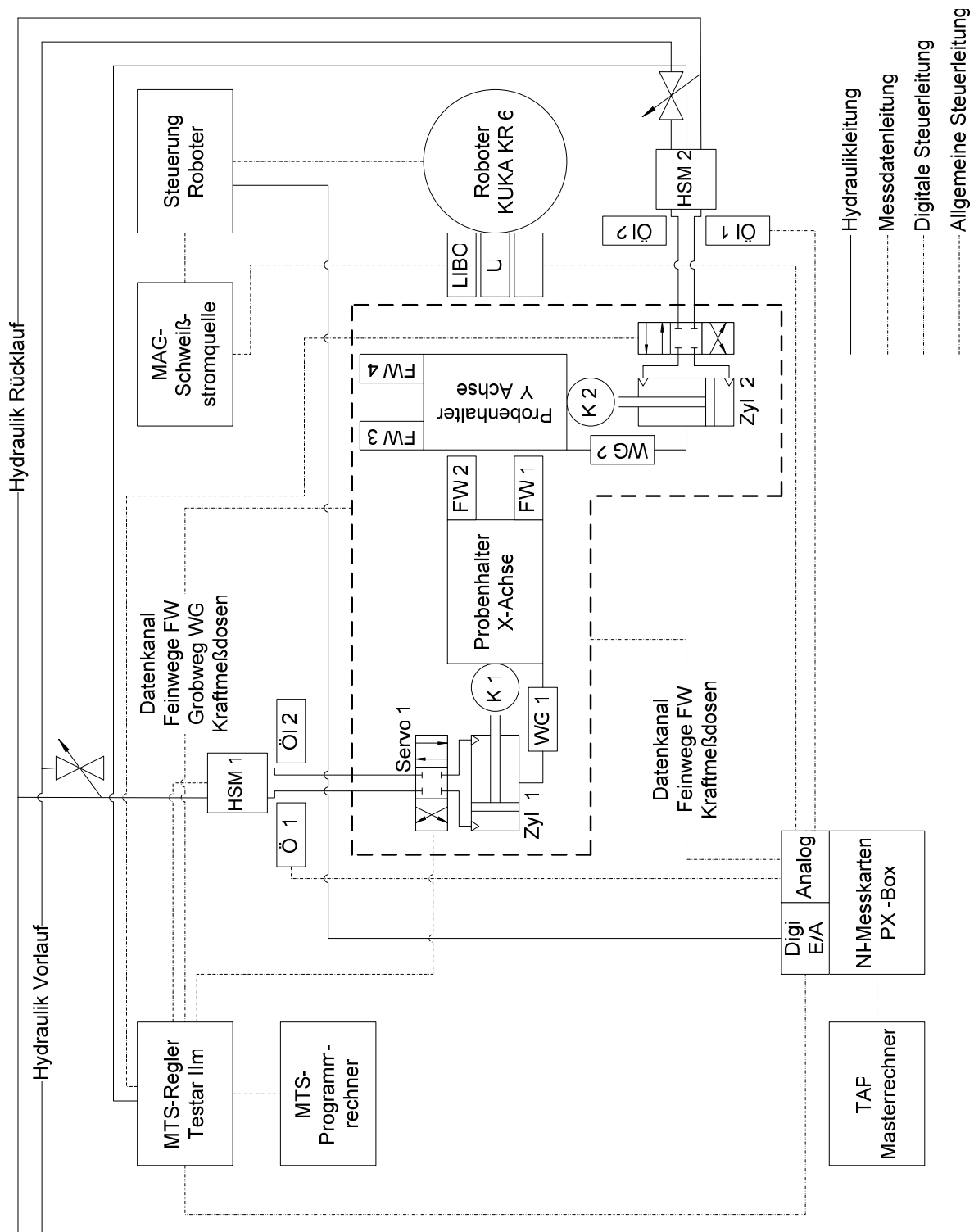


Abb. 2.1 Übersicht Versuchsaufbau

Roboters ergänzt und umgeschrieben. Die Erfassung der Mess- und Steuerdaten während des Versuches erfolgt über eine Vielzahl an Sensoren und Aufnehmern. Besonderes Augenmerk wurde auf die Störunempfindlichkeit der Feinwegsensoren gelegt. Vorversuche mit induktiven LVDT-Wegsensoren zeigten, dass eine Beeinflussung durch die beim Schweißen auftretenden elektromagnetischen Felder eine Erfassung der Versuchsdaten zum Teil unmöglich macht. Um eine sichere und einwandfreie Wegmessung zu gewährleisten, findet ein Wegmeßsystem auf Wirbelstrombasis (NVDT 3300®, Fa. Micro-Epsilon) Anwendung. Der Vorteil dieses Meßsystems ist in seiner Unempfindlichkeit gegenüber äußeren Störgrößen wie Schmutz, Rauche und auch elektromagnetischen Feldern, zu sehen. Einzelheit zur messtechnischen Ausstattung sind dem Kapitel 2.3 zu entnehmen.

Das von den Messsensoren bereitgestellte analoge Datensignal wird über eine Messkarte der Firma National Instrument erfasst und an einen zentralen Steuerrechner (Master) weitergeleitet. Die Aufzeichnung der Versuchsdaten (14 Datenkanäle) kann mit einer variablen Abtastrate von bis zu 25 kHz erfolgen. Änderungen in der Sensorenerfassung, die nur Bruchteile einer hundertstel Sekunde dauern, können somit sicher erkannt und erfasst werden. Somit ist es möglich, Stromspannungs- und Stromstärkeverläufe, z.B. während der Tropfenablösung beim Schweißen im Pulslichtbogen, aufzulösen. Neben der Aufzeichnung der Versuchsdaten übernimmt der Masterrechner die zeitliche Koordinierung des Versuchsablaufes. Als vorteilhaft ist die zeitliche Reproduzierbarkeit der Versuchsbedingungen anzusehen. Einzelne Versuchsabschnitte, wie z.B. das Anstarten der Hydraulik oder des Schweißprozesses, laufen, auch bei mehrfacher Wiederholung, quasi zeitlich identisch ab. Die Ansteuerung der einzelnen Versuchstandskomponenten erfolgt über digitale Triggerimpulse. Um eine größtmögliche Sicherheit während des Versuches zu gewährleisten, ist jedem Startsignal ein Response-Signal zugeordnet, so dass der Versuchsablauf erst fortgesetzt wird, wenn die jeweils angestartete Komponente ihre einwandfreie Funktion bestätigt hat. Die zur Versuchssteuerung notwendige Meß- und Steuersoftware wurde in Zusammenarbeit mit der Firma TAP in Bremen entwickelt.

2.2.2 Versuchsrahmen und Probenhalterung

Wie im vorhergehenden Abschnitt dargestellt, bildet die Zwei-Achsen-Prüfmaschine den Mittelpunkt des errichteten Versuchstandes. Die sich aus den Anforderungen der Versuchsdurchführung ergebenden Randbedingungen an die konstruktive Gestaltung der Prüfmaschine wurden in mehreren Entwicklungsschritten bei der Planung bzw. dem Bau berücksichtigt. Zusätzlich mussten diverse Vorgaben hinsichtlich der technischen Umsetzung bei der Planung beachtet werden, die sich aus maximalen Bauteil- und Transportabmessungen ergaben.

Aus der Perspektive der Abbildung 2.2 ist das Konstruktionsprinzip der Prüfmaschine ersichtlich. Auf eine Darstellung zusätzlicher Anbauteile wurde zugunsten der Übersicht verzichtet. Das Grundgerüst des Versuchsrahmens besteht aus handelsübli-

chen Stahlträgern HEB 300 der Stahlgüte S355J2G3, welche miteinander verschweißt wurden. Der Versuchsrahmen untergliedert sich in eine Haupt- und Nebenachse, die rechtwinklig zueinander angeordnet sind und die Lagerschlitten sowie die Hydraulikzylinder aufnehmen. Die Abmessungen der L-förmigen Konstruktion betragen in Richtung der Hauptachse 5,00 m, in Richtung der Nebenachse 4,00 m, so dass sich das Gewicht der Stahlrahmenkonstruktion zu rd. 12 to ohne Einbauten ergibt.

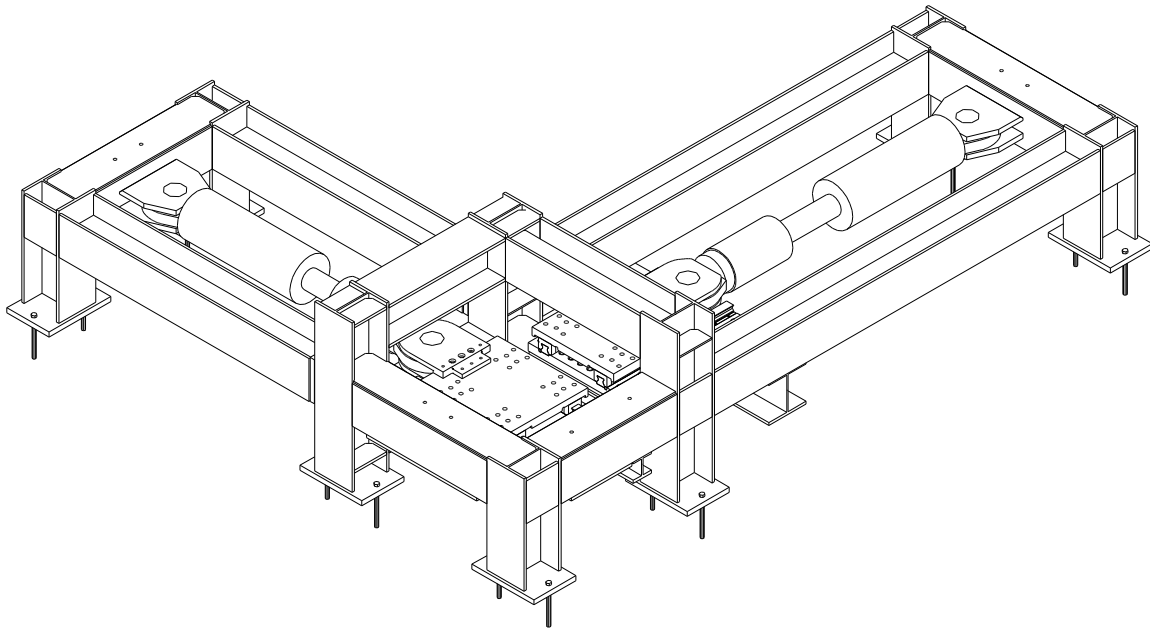


Abb. 2.2 Konstruktionsperspektive des Versuchsrahmens

Aufgrund der geometrischen Abmessungen ist eine Zerlegung des Prüfrahmens zum Zwecke von Transport- oder Einrichtarbeiten sinnvoll und notwendig. Der Rahmen wurde daher zweiteilig ausgeführt. Wie aus der Abbildung 2.2 und 2.3 ersichtlich, ist der Rahmen in eine Haupt und Nebenachse untergliedert, welche im Endzustand miteinander verschraubt sind. Die Verbindung der Teilrahmen erfolgt mittels Stirnplattenstoß als GVP-Verbindung mit je vier Schrauben M30 der Güteklasse 10.9. Um einen einwandfreien Sitz der Stirnplatten zueinander sicherzustellen, wurde die Kontaktfläche nach den erforderlichen Schweißarbeiten plan gefräst, so dass ein flächiges Aufliegen der Stirnplatten untereinander gewährleistet ist. Infolge der aufgebrachten Schraubenvorspannung ist die Verbindung der Rahmen quasi spielfrei und stellt somit unter Betriebsbeanspruchung keine Störgröße für die hydraulische Regelung der Versuchskörperbewegung dar.

Die spielfreie Lagerung und Führung der Probenbleche ist eine der wichtigsten Randbedingungen bei der Planung der Versuchseinrichtung. Infolge der mechanischen Beanspruchung der Schweißprobe während des Versuches treten Verformungen am Prüfkörper selber, der Rahmenkonstruktion sowie sämtlichen Lagerungselementen und Verbindungen auf. Entscheidend für die Aussagekraft der durchgeführten Versuche ist

die zum Zeitpunkt der Schweißung tatsächlich vorhandene Bewegung der Nahtflanken relativ zueinander. D.h. die aufgebrachte Bewegungsamplitude muss während des Versuches an den Nahtflanken vorliegen und darf nicht im Schlupf der Maschinentoleranz verschwinden. Dieser Forderung ist umso mehr Aufmerksamkeit zu schenken, je kleiner die aufzubringenden Prüfkörperbewegungen werden. Um eine spielfreie Lagerung bzw. Probenhalterung zu gewährleisten, erfolgt die Verschraubung der Versuchsbleche mit den Lagerschlitten durch eine Presspassung, vgl. Abb. 2.3. Dazu werden die Probenbleche über die in den Lagerschlitten eingelassenen Passbolzen gestülpt und durch HV-Muttern mit dem Lagerschlitten verschraubt. Pro Lagerschlitten halten 13 Passbolzen M16 der Güteklasse 10.9 das Probenblech und verhindern eine Veränderung des Lagersitzes während des Versuches. Die Schraubenverbindung ist so ausgelegt, dass eine theoretische Krafteinleitung von 1500 kN in das Probenblech möglich ist, ohne dass eine Beschädigung der Anschlussmittel auftritt. Um lokale Plastizierungen an Teilen der Lagerschlitten, insbesondere im Bereich der Passbolzenbrust zu vermeiden, wurden die Lagerschlitten und deren Anbauteile aus einem Feinkornbaustahl S690QL1 gefertigt.

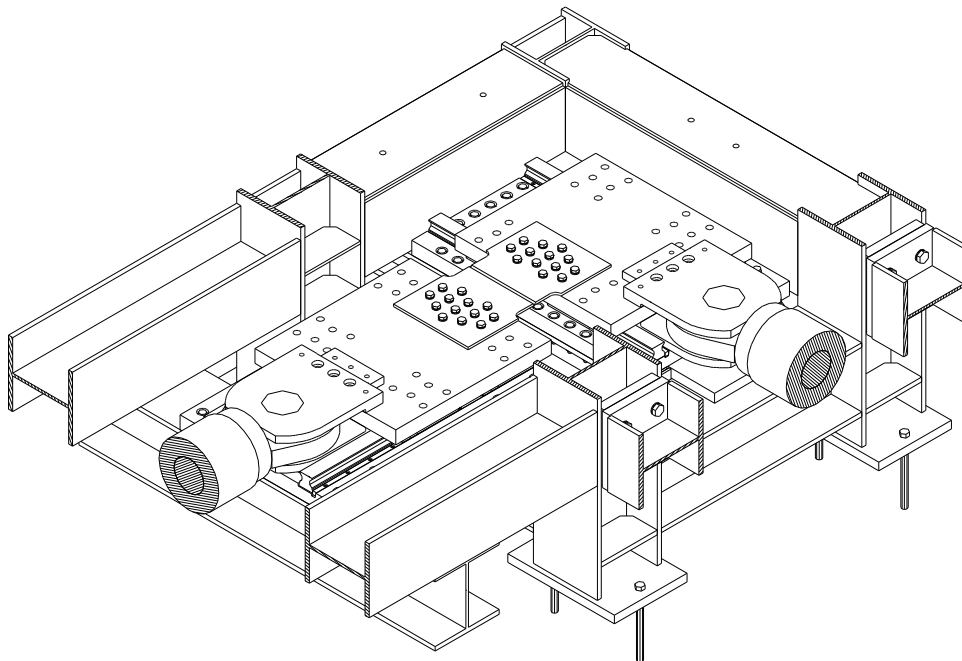


Abb. 2.3 Arbeitsbereich des Prüfrahmens

Die Lagerung und Führung der Schlitten erfolgt mittels vorgespannter Rollenschienenführungen (Größe 65, Fa. Bosch Rexroth). Im Gegensatz zu anderen Lagersystemen, zeichnen sich die verwendeten Rollenschienenführungen durch größtmögliche Präzision, die Aufnahme größter Lagerkräfte bei dynamischer Beanspruchung (maximale dynamische Lagerkraft pro Führungswagen von 265 kN), eine hohe Steifigkeit sowie eine geringen Reibungszahl von 0,001 aus. Für die Güte der Versuchsergebnisse besitzt die



Abb. 2.4 Führungsschienen mit Lagerblech

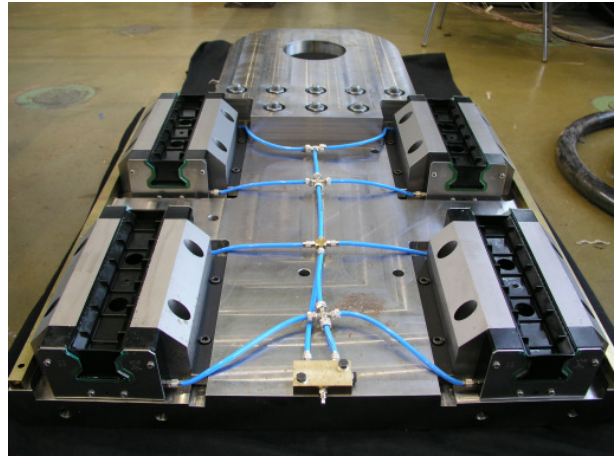


Abb. 2.5 Lagerschlitten mit Führungswagen und Schmierstoffleitungen

Steifigkeit der Lagereinheiten eine besondere Bedeutung. Neben der bereits genannten Schlupffreiheit der Passverbindung von Versuchsblech und Lagerschlitten muss eine ausreichend hohe Steifigkeit der Versuchseinrichtung selbst gewährleistet werden. Die während des Versuches auftretenden Kraftexzentrizitäten bewirken bei mangelnder Steifigkeit der Konstruktion eine Verdrehung der Lagerschlitten bzw. der Blechproben, wodurch die Parallelität der Nahtflanken nicht mehr gegeben ist. Durch die Verwendung der Rollenschienenführungen für die Lagerung der Schlitten werden die auftretenden Versatzmomente auf die insgesamt vier Führungswagen pro Lagerschlitten aufgeteilt und über die Führungsschienenaufnahme direkt in die Rahmenkonstruktion abgeleitet, vgl. Abb. 2.4 und 2.5. Verdrehungen und damit Auswirkungen auf die Qualität der Untersuchung werden durch die hohe Steifigkeit der vorgespannten Lagerung auf ein Minimum reduziert. Die Verbindung des Lagerbleches der Führungsschienen mit der Rahmenkonstruktion erfolgt als SLVP-Verbindung mit Schrauben M16 der Güteklasse 10.9. Wie aus der Abb. 2.7 zu erkennen, liegt das Lagerblech auf Anschlussblechen (Lagersitze) auf, die unterseitig an den Versuchrahmen angeschweißt sind. Zur Sicherstellung des vollflächigen Aufliegens der Lagerbleche, wurden die Lagersitze der Anschlussbleche plan gefräst, vgl. Abb. 2.6.

Um eine dauerhafte Funktionstüchtigkeit der Rollenschienenführungen zu gewährleisten, müssen die Führungswagen nach jedem fünften Versuch abgeschmiert werden. Grund für die Häufigkeit der Schmierung ist die untypische Beanspruchung der Lagerelemente durch den versuchsbedingten Oszillationshub. Die extrem kurzen Hübe von maximal ± 2 mm bewirken eine Unterbrechung des Schmierfilms zwischen den Walzen der Führungswagen und der Laufschiene. Im Falle eines dauerhaften Schmierfilmaustrisses besteht die Gefahr der vorzeitigen „Grübchenbildung“ auf der Laufschieneoberfläche, was in letzter Konsequenz zu einem erhöhten Lagerverschleiß und damit dem Verlust der Präzision führt. Zur Gewährleistung einer ausreichenden Schmierstoffversorgung der Walzen ist daher die Durchführung von Schmierzügen zwingend erforderlich. Während der Schmierzüge wird mittels einer Zentralschmierung Öl zu den Lagerwalzen



Abb. 2.6 Planfräsen der Auflagerbleche



Abb. 2.7 Verbindung Lagerblech mit Auflagerblechen der Rahmenkonstruktion

in den Umlaufkäfigen der Führungswagen gepresst (Abb. 2.5) und durch die gleichzeitige Lagerbewegung im Rollenkäfig verteilt.

Die Beanspruchung des Versuchskörpers erfolgt über zwei Servo-Hydraulikzylinder, welche die Lagerschlitten mit dem Versuchsrahmen koppeln. Zwischen den Hydraulikzylindern und den Lagerschlitten ist jeweils eine 1,2 MN Kraftmessdose, Typ RF[®] der Fa. GTM zur Überwachung und Steuerung der Hydraulik bzw. Messwerteerfassung angeordnet. Die Kraftmessdose ist bei dynamischer Beanspruchung bis zu einer Kraft von 900 kN dauerfest und ermöglicht so eine direkte Messung im axialen Kraftstrang. Um eine Beanspruchung des Zylindergestänges sowie der Kraftmessdose durch Querkräfte und Momente infolge unsymmetrischer Lasteinleitung konstruktiv auszuschließen, ist der Hydraulikzylinder als Pendelstab zwischen den Lagerschlitten und dem Versuchsrahmen ausgeführt. Auftretende Exzentrizitätsmomente und Kräfte werden durch die Führungswagen der Rollenschienenführungen aufgenommen, wodurch eine zusätzliche Beanspruchung der Hydraulikzylinder vermieden wird. Die gelenkige Lagerung der Zylinder wird durch Kugelhöpfe an den Anschlusspunkten sichergestellt. Um die Montage der Hydraulikzylinder zu erleichtern und die Querkraftbeeinflussung der Kraftmessdosen durch das Eigengewicht der Zylinder zu minimieren, erfolgt eine zusätzliche, federnd gelagerte Abfangung der Zylinder, vgl. Abb. 2.8. Diese zusätzliche Lagerung erlaubt eine variable Orientierung des Hydraulikzylinders in der Höhe, so dass die vertikale Auflagerkraft der Zylinder an den Lagerschlitten zu Null eingestellt werden kann. Infolge dieses Vorgehens wird die Querkraftbeanspruchung der Kraftmessdose im Laststrang verringert, was zu einer Steigerung der Messgenauigkeit führt. Der Anschluss des Hydraulikzylinders mit den Lagerschlitten bzw. der Rahmenkonstruktion erfolgt über eine Bolzenverbindung. Bolzen und Augenbleche sind zur Minimierung des Lagerspiels auf Passung gearbeitet. Der Bolzen besitzt einen Kerndurchmesser von 140 mm und ist aus einem Vergütungsstahl 42CrMoV4 gefertigt. Die Augenbleche zum Anschluss des Hydraulikzylinders an den Lagerschlitten bestehen aus Feinkornbaustahl S690QL1 und sind mit dem Lagerschlitten auf Passung verschraubt. Der Anschluss des Zylinders an

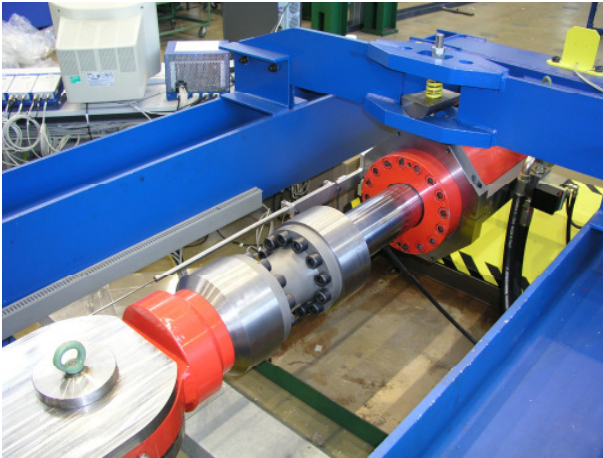


Abb. 2.8 Abfangung Hydraulikzylinder



Abb. 2.9 Rissprüfung der Schweißnähte

den Versuchsrahmen erfolgt über aufgeschweißte Augenlaschen aus S355J2G3. Zur Sicherstellung der Rissfreiheit erfolgte eine Überprüfung der Schweißnähte mittels Farbeindringverfahren, vgl. Abb. 2.9

2.2.3 Hydraulikkomponenten

Der Aufbau des hydraulischen Systems ist vereinfacht in Abb. 2.1 dargestellt und gliedert sich in die drei Hauptelemente Flüssigkeitsstromerzeuger (Pumpe, zentrales Hydrauliksystem), Flüssigkeitsstromverbraucher (Hydraulikzylinder) sowie Steuer- und Regeleinrichtung (Servoventil, HSM-Einheit, MTS-Testar II^m®). Die Auslegung des Systems erfolgt aufgrund der verwendeten Hydraulikzylinder (einseitige Kolbenstange) und der damit verbundenen Differenz zwischen zufließendem und zurückfließendem Volumenstrom als *offener Kreislauf*. Zur Versorgung der Hydraulikzylinder mit Energie werden diese an das hauseigene Hydrauliksystem angeschlossen. Dieses wird von zwei Hydraulikpumpen gespeist, welche unter Volllast einen Hydraulikölvolumenstrom von 250 l/min bei 280 bar zur Verfügung stellen. Die Ansteuerung der Hydraulikzylinder erfolgt durch Lenkung des Hydraulikstroms mittels direkt am Zylinder angebrachten 4/3-Wegeventilen. Um während der Schweißversuche auftretende hydraulische Leistungsspitzen aufzufangen sowie Schwingungen und Druckstöße in der Druck- und Rücklaufleitung des Hydrauliksystems abzuf puffern, sind zwischen dem zentralen Hydrauliksystem und den Hydraulikzylindern modifizierte HSM-Einheiten angeordnet.

Die zur Anwendung kommenden Hydraulikzylinder der Fa. Hänchen weisen eine modifizierte Ringspalttdichtung auf, die einen kurzzeitigen Betrieb der Zylinder im prüfungsrelevanten Oszillationhubbereich erlaubt, ohne dass es zu einer Beschädigung des Zylindergestänges kommt. Der verwendete spezielle Dichtungseinsatz ermöglicht ferner eine *stick-slip-arme Bewegung* der Hydraulikzylinder, so dass gerade im unteren Amplitudenbereich der Bewegung negative Effekte auf die Qualität der Ansteuerung der Zylinder minimiert werden und damit für die Versuchsdurchführung ohne Bedeutung sind.

Um eine präzise Ansteuerung der Hydraulikzylinder bei größeren Frequenzen und Hüben zu gewährleisten, werden Servoventile vom Typ HVM 067[®] der Fa. Schneider Kreuznach verwendet, die ein Nenndurchfluss von 120 l/min Hydrauliköl bei 70 bar Druckdifferenz sowie eine hohe Dynamik bei geringer Linearitätsabweichung aufweisen. Zur Minimierung auftretender Schwingungen der Hydraulikölsäule, infolge der auftretenden dynamischen Beanspruchung, erfolgt eine direkte Montage der Servoventile auf den Hydraulikzylindern. Abb. 20.10 zeigt das auf den Verteilungsblock des Hydraulikzylinders montierte Servoventil.

Wie bereits dargestellt, erfolgt zur Schwingungsabsorption sowie zur Deckung von Leistungsspitzen die Anordnung von modifizierten hydraulischen Anschlusseinheiten vom Typ HSM[®] der Firma MTS (Abb. 2.11). Die verwendeten hydraulischen Anschlusseinheiten erfüllen damit im Wesentlichen die Funktionen der Speicherung, Dämpfung, Druckregelung und Filterung sowie Schaltfunktionen des Hydraulikflusses. Zur Abdeckung von Leistungsspitzen sowie zur Dämpfung des Hydrauliksystems sind die verwendeten HSM-Einheiten mit 7,5 Liter Kolbenspeichern der Fa. Hydac im Hydraulikvor- und -rücklauf ausgestattet. Die Vorspannung der Speicher orientiert sich an den Herstellerempfehlungen und stellt einen Kompromiss aus der maximalen Speicherung der Druckölenergie sowie der optimalen Systemdämpfung dar. Aufgrund der Variabilität der Steifigkeitsverhältnisse während der Versuchsdurchführung ist eine analytische Bestimmung der optimalen Vorspannung nicht möglich, so dass diese auf experimentellem Wege gefunden wurde. Für die Vorspannung im Hydraulikvorlauf stellt sich ein Wert von 190 bar bei einer Rücklaufvorspannung von 5 bar als optimal dar. Zum Einrichten des Versuchsstandes ist ein Betrieb der Anlage beim Anliegen des vollen Betriebsdruckes aus Sicherheitsgründen nicht wünschenswert. Mittels zwei elektrisch ansteuerbarer 3/2-Wegeventilen (Niederdruck- und Hochdruckventil) ist das Ein- und Ausschalten des Hydraulikdruckes sowie die Umschaltung von Nieder- auf Hochdruckbetrieb der Anlage möglich. Die Ansteuerung der Ventile erfolgt über die angeschlossene Hydraulikregelung MTS-Testar II[®]. Zusätzlich sind die HSM-Einheiten in den Sicherheitsschaltkreis des Versuchsstandes integriert, so dass beim Vorhandensein einer Störung oder Aus-

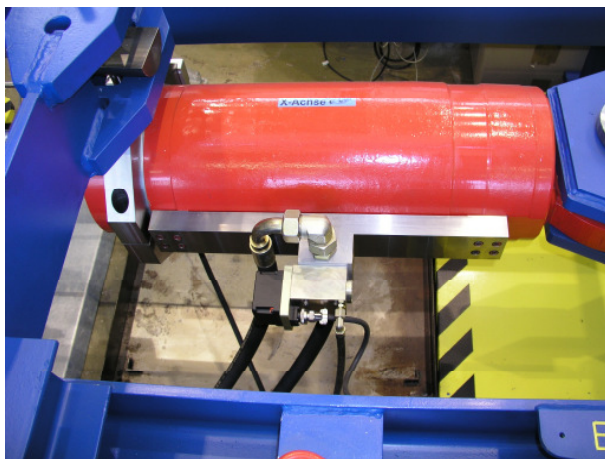


Abb. 2.10 Zylinder mit Servoventil und Anschlussblock

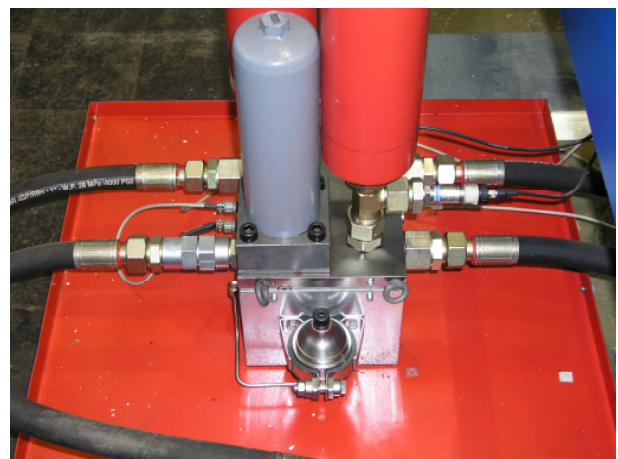


Abb. 2.11 Hydraulische Anschlusseinheit mit Filter (grau) und Speicher (rot)

lösung der Notausfunktion der Hydraulikdruck zum Verbraucher unterbrochen und direkt in die Rückflussleitung umgeleitet wird. Rückschlagventile in der Anschlusseinheit stellen zusätzlich die korrekte Flussrichtung der Hydraulikflüssigkeit sicher und dienen dem Schutz der Filter. Der Einbau eines zusätzlichen Druckregelventils erlaubt zudem die stufenlose Einstellung des Ausgangsdruckes für den Niederdruckbetrieb in einem Bereich von 10 bar bis zum vollen Systemdruck. Um einer Verschmutzung der Servoventile aus der Hydraulikflüssigkeit zu begegnen und somit die Lebensdauer bzw. Betriebssicherheit zu erhöhen, ist jede Anschlusseinheit mit einem 3µm-Partikelfilter ausgestattet. Diese filtern den Hydraulikstrom zusätzlich zu den vorhandenen Pumpenfiltern, so dass eventuell eingetragene Schmutzpartikel die empfindliche Mechanik der Servoventile nicht beeinträchtigen können.

2.2.4 Schweißtechnische Ausstattung

Zur Gewährleistung reproduzierbarer Versuchsergebnisse ist die Integration des Schweißverfahrens in den automatisierten Versuchsablauf unumgänglich. Wie bereits dargelegt, wurde mit Blick auf die Praxis das mittels Roboter automatisierte MAG-Schweißverfahren zur Herstellung der Schweißnähte ausgewählt. Roboter und Schweißstromquelle bilden eine für sich abgeschlossene Einheit, welche über digitale E/A-Schnittstellen in den Versuchsaufbau integriert ist und über den zentralen Steuerungsrechner (Master) angesprochen wird. Das zur Verfügung stehende Schweißgerät besteht aus einer Inverterstromquelle vom Typ Trans Synergic 5000 Comfort®, der Fa. Fronius und einer Push-Pull-Einheit zur Schweißdrahtförderung. Die verwendete Stromquelle weist einen Wirkungsgrad von 89% auf. Der Schweißstrombereich erstreckt sich von 3 bis 500 A, wobei ein maximaler Schweißstrom von 360 A bei einer Einschaltdauer von 100% zur Verfügung steht. Weiterhin besteht die Möglichkeit des Schweißens im Pulslichtbogen bei einem Frequenzbereich von 2 bis 1000 Hz. Die Fest-

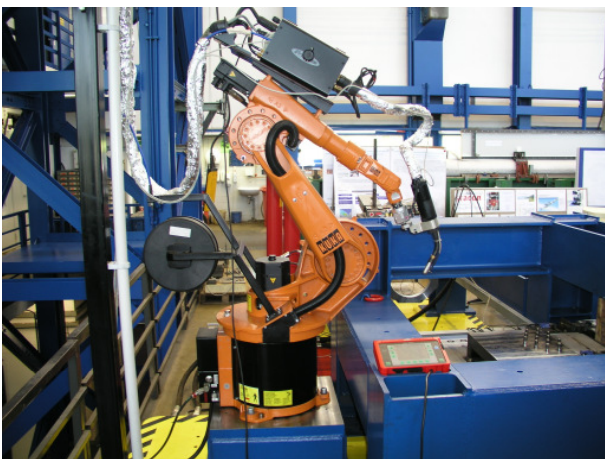


Abb. 2.12 Schweißroboter KR6 mit Push-Pull-Einheit



Abb. 2.13 Gekapselte Schweißstromquelle mit Fernbedinpanel

legung der Schweißparameter erfolgt über ein separates Fernbedienpanel RCU 5000i®. Abb. 2.12 zeigt die auf dem Roboter montierte Drahtfördereinheit sowie die Verbindung mit dem Schweißbrenner am Roboterarm. Der verwendete Knickarmroboter vom Typ KR 6® der Fa. KUKA erlaubt aufgrund seiner sechs Freiheitsgrade eine variable Anpassung an die jeweilige Schweißaufgabe und somit die optimale Ausrichtung des Brenners. Um eine Beeinflussung der Messsensoren durch das beim Schweißen auftretende elektromagnetische Feld zu minimieren, sind sämtliche Stromleitungen vom Schweißgerät zum Schweißbrenner bzw. Roboter sowie das Massekabel von der Schweißprobenhalterung (Lagerschlitten) zum Schweißgerät zusätzlich geschirmt worden. Eine weitere Reduktion der emittierenden elektromagnetischen Strahlung konnte durch eine intelligente Kabelführung erreicht werden. Schweißstromzu- und -ableitung liegen direkt nebeneinander, so dass die den elektrischen Leiter umgebenden Feldlinien eine gegensätzliche Orientierung aufweisen, was zu einer Reduktion der emittierenden elektromagnetischen Strahlung führt.

2.2.5 Messtechnische Ausstattung

Die Dokumentation der Schweißversuche sowie die Überwachung und Steuerung des Versuchsablaufes bedingt eine lückenlose Erfassung aller wichtigen Prozessparameter. Zu diesem Zweck werden über diverse, in den Versuchsstand integrierte Sensoren, die notwendigen Prozessdaten erfasst und an die einzelnen Steuerungssysteme sowie die zentrale Datenerfassung weitergeleitet. Insgesamt ist der Versuchstand mit einer Vielzahl von Messsensoren ausgestattet, von denen die vierzehn wichtigsten zentral erfasst und zur Dokumentation realtime abgespeichert werden. Eine besondere Bedeutung kommt dabei der Sensorenabtastrate sowie der Unempfindlichkeit gegenüber Störgrö-

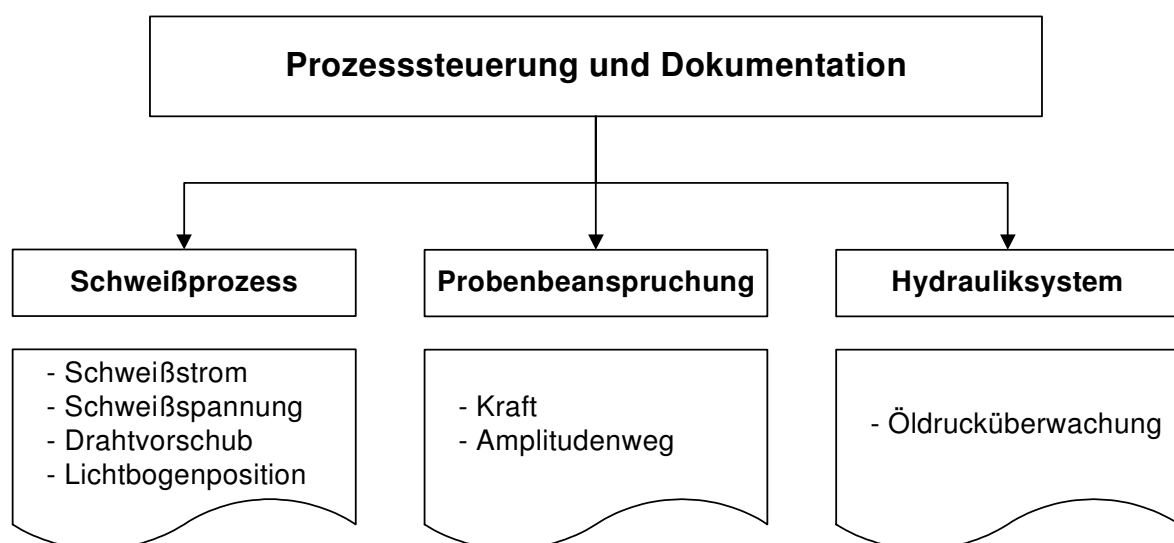


Abb. 2.14 Sensorenuordnung und Dokumentationsstruktur

Ben zu. Zur sicheren Erfassung und Auflösung aller entscheidenden Versuchsparameter erfolgt die Datenerfassung und –aufzeichnung mit einer Frequenz von 25 kHz pro Datenkanal. Wie aus dem Organigramm der Abb. 2.14 ersichtlich, gliedert sich die Prozessdatenerfassung in die drei Dokumentationsgruppen Schweißprozess, Probenbeanspruchung und Hydrauliksystem auf.

Um eine Aussage zur Güte des Schweißprozess selbst sowie zur Qualität der Schweißstromquelle treffen zu können, müssen die während der Schweißung anliegenden Schweißparameter erfasst, dokumentiert und mit den Vorgaben verglichen werden. Während der Schweißung auftretende Fehler oder Effekte können so in einem späteren Schritt analysiert und zugeordnet werden. Die wesentlichen Schweißparameter sind die Größen des Schweißstroms, der Schweißspannung sowie die Position des Lichtbogens zu einem diskreten Zeitpunkt. Anhand des transienten Verlaufes dieser drei Größen lässt sich der Schweißprozess ausreichend genau charakterisieren, so dass eine zutreffende Beschreibung im Rahmen einer numerischen Simulation möglich ist. Gleichzeitig dienen die aufgezeichneten Schweißprozessdaten als Qualitätssicherung. Unzulänglichkeiten, wie z.B. Kurzschlüsse beim Tropfenübergang während der Schweißung im Impulslichtbogen, können erfasst werden, so dass eine Optimierung des Schweißprozesses schneller und sicherer möglich ist.

Die Erfassung des Schweißstromes erfolgt induktiv durch Messung am Schweißmassekabel mittels eines Stromwandlers vom Typ LT 500-S/SP11[®] der Fa. LEM, welcher sich durch eine geringe Störanfälligkeit gegenüber Fremdfeldern sowie durch eine sehr gute Linearität und Messgenauigkeit auszeichnet. Durch die galvanische Trennung von Schweißstrom und Messelektronik kann auf zusätzliche Absicherungen zum Schutz der Messkarten verzichtet werden. Der Messbereich des Stromwandlers reicht von 0 bis ± 1000 A bei einer analogen Ausgangsspannung von ± 10 V.

Zur Messung des Spannungsabfalls am Lichtbogen ist der Spannungssensor direkt mit dem Kontaktrohr am Schweißbrenner sowie der Schweißprobe selbst verbunden. Die Spannungsmessung erfolgt im Nebenschluss. Der Anschluss der Messleitung an das Kontaktrohr des Brenners erfolgt durch eine Messingschraubverbindung M3,

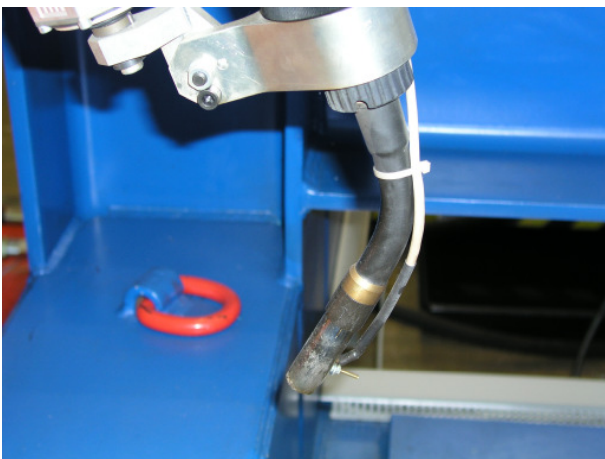


Abb. 2.15 Anschluss des Spannungssensors an den Schweißbrenner

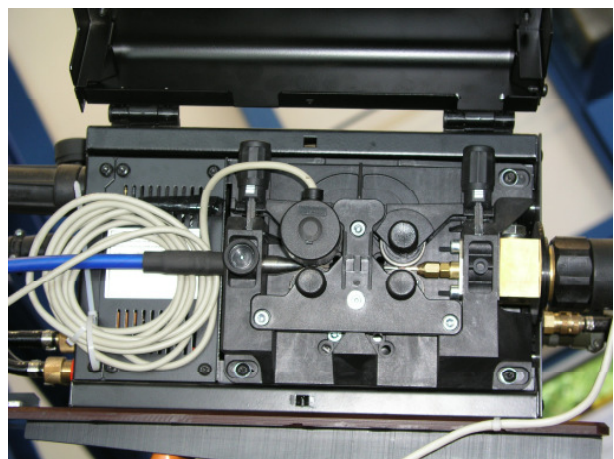


Abb. 2.16 Drehinkrementalgeber mit Drahtfördereinheit

welche durch die elektrisch isolierte Gasdüse geführt ist, vgl. Abb. 2.15. Zur Isolation der Messleitung gegenüber der Gasdüse wird ein durchbohrter Teflon[®]-Pfropfen verwendet. Der verwendete Sensor weist einen Messbereich von ± 150 V auf, so dass Spannungsspitzen während der Schweiß- und Zündphase sicher erfasst werden können.

Abb. 2.16 zeigt den Drehinkrementalgeber vom Typ BHK 16.24K360-E6-5[®] der Fa. Baumer, welcher zur Messung des Drahtvorschubes direkt mit der Antriebseinheit der Drahtfördereinheit verbunden wurde. Der Drehinkrementalgeber liefert ein digitales Ausgangssignal in Form von 360 Stromimpulsen bei einer vollständigen Umdrehung der Drahtandruckrolle.

Die Bestimmung der Lichtbogenposition erfolgt indirekt durch die Positionsbestimmung des TCPs (**Tool Center Point**) der Robotersteuerung, bezogen auf ein beliebig definierbares Koordinatensystem. Der TCP dient in erster Linie der positionsgenauen Ansteuerung des Roboters und ist für jedes Werkzeug, welches an dem Roboter montiert wird, neu zu bestimmen. Im vorliegenden Fall befindet sich der TCP in gerader Verlängerung des Schweißbrenners, 10 mm vor dem Kontaktrohr. Durch Einmessen eines so genannten Basiskoordinatensystems, welches per Definition seinen Ursprung am Startpunkt der Schweißung besitzt, ist ein Bezug des TCPs auf den Koordinatenursprung, durch die Angabe von Koordinaten in den drei Raumachsen, möglich. Mit der Festlegung des Start- und Endpunktes der Schweißung ist die Wegstrecke zwischen den beiden Punkten bekannt, so dass eine Ausgabe der Lichtbogenposition als physikalisch analoges 0 bis 10 V Signal erfolgen kann. Die dazu notwendigen Berechnungsalgorithmen sind programmseitig in das Steuerungsprogramm des Roboters integriert.

Zur Beurteilung des mechanischen Verhaltens der Probe während des Versuches, ist die Kenntnis der vorhandenen Kräfte und gefahrenen Wege unerlässlich. Jede Achse ist mit einer 1,2 MN Kraftmessdose vom Typ RF[®] der Fa. GTM (Genauigkeitsklasse 0,02) ausgestattet, die eine Dauerfestigkeit von ± 900 kN unter dynamischer Beanspruchung aufweist. Die Signalausgabe erfolgt als analoges ± 10 V Signal. Abb. 2.17 zeigt eine direkt im Laststrang montierte Kraftmessdose. Zur Verbindung der Kraftmessdose

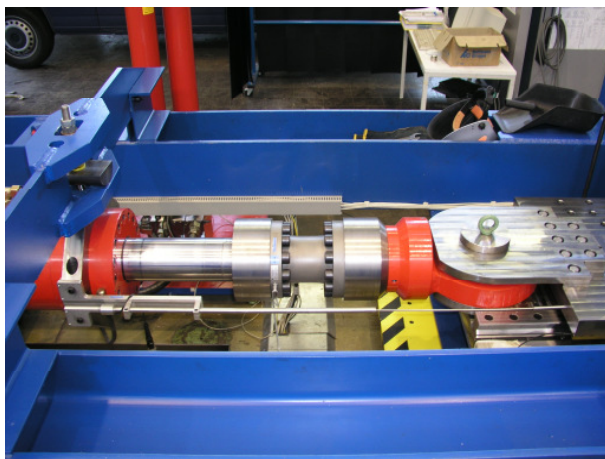


Abb. 2.17 Kraftmessdose mit Hydraulikzylinder und Lagerschlitten, Grobpositionierung mit LVDT (Vordergrund)

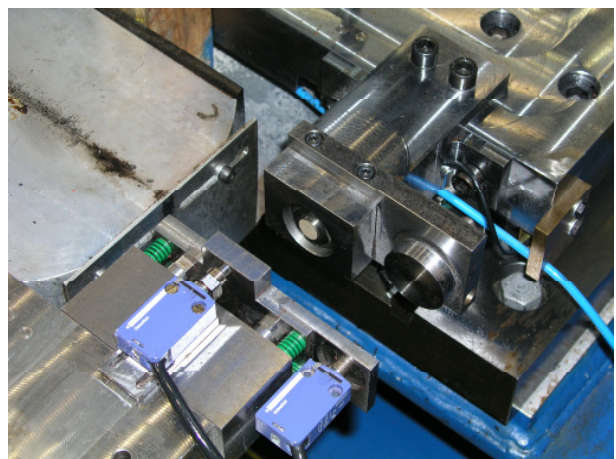


Abb. 2.18 Feinwegsensor NCDT 3300 mit Targetblech sowie Notaus- und Vorwarntastern (blau)

mit dem Hydraulikzylinder bzw. dem Lagerschlitten werden speziell angefertigte Adapterstücke aus Vergütungsstahl 42CrMoV4 verwendet. Der Anschluss des Adapterstücks an den Zylinder erfolgt über eine vorgespannte Schraubverbindung M140. Zum Anschluss der Kraftmessdose an die Adapterstücke werden je Ringflanschverbindung zwölf vorgespannte Schrauben M24 der Güteklasse 12.9 verwendet. Die verwendeten Kraftmessdosen zeichnen sich durch eine sehr hohe Genauigkeit sowie einer Unempfindlichkeit gegenüber Querkraft und Momentenbeanspruchung aus. Das maximal ohne Beeinflussung der Kraftmessung aufnehmbare Exzentrizitätsmoment beträgt 5000 Nm.

Für den reibungslosen Ablauf des Versuchsbetriebes ist die einwandfreie und gesicherte Messung des Fahrweges der Lagerschlitten von größter Bedeutung. Grundsätzlich sind zwei Steuerungsfälle unter Wegregelung zu unterscheiden. Zum Einbau der Versuchskörper sowie zur Durchführung der Schmierhübe müssen die Lagerschlitten Fahrwege von rd. 35 cm ausführen. Nach Abschluss des Probeneinbaus und dem Verfahren der Schlitten in die Versuchsausgangsposition erfolgt das genaue Abfahren des Versuchsbewegungsprogramms. Die dabei anzusteuern Bewegungskläufe weisen Wegamplituden von 0,1 bis 2,0 mm auf. Dieser Sachverhalt bedingt, aufgrund der unterschiedlichen Größe des Bewegungsspiels und den damit verbunden Anforderungen an die Messgenauigkeit, zwangsläufig die Notwendigkeit der getrennten Wegmessung.

Für die Grobpositionierung der Lagerschlitten (Einrichtbetrieb) werden LVDT-Wegsensoren verwendet, die einen Messbereich von maximal 600 mm aufweisen. Wie in Abb. 2.17 zu erkennen, ist je Lastachse der LVDT-Wegsensor mit dem Hydraulikzylinder sowie dem Lagerschlitten gekoppelt, so dass eine Ansteuerung und Positionierung des Zylinders in Abhängigkeit des Weges möglich ist.

Die sichere und einwandfreie Messung der Bewegungsamplituden während des Schweißversuches stellt die größte messtechnische Herausforderung dar. Eine direkte Messung der Nahtflankenbewegung im Bereich der Schweißnaht wäre aus Sicht der Forschung ein Optimum, welches jedoch aufgrund der thermischen und mechanischen Beanspruchung nicht erreichbar ist. Das Messen der aufgetragenen Bewegung muss daher mit einem gewissen Abstand zum Schmelzbad und damit der Nahtflanken erfolgen. Als Kompromiss zwischen dem Wunsch nach Eindeutigkeit und der technisch möglichen Umsetzung wird die Relativwegmessung zwischen den Lagern der Versuchsbleche angesehen. Durch die Verbindung der Probenbleche mit den Lagereinheiten des Versuchsaufbaus mittels Presspassung ist eine Beeinträchtigung der Versuchsergebnisse durch eine fehlerhafte Wegmessung infolge Maschinenschlupfs nicht gegeben. Im Gegensatz zu einer nur theoretisch möglichen Steuerung der Nahtflankenbewegung bei direkter Messung an selbigen darf davon ausgegangen werden, dass die Versuchsergebnisse durch die Wegmessung zwischen den Lagerpunkten nur marginal beeinflusst werden. Die Zulässigkeit diese Annahme liegt neben dem lokalen Abfall des E-Moduls im Bereich der Schweißung infolge des Schweißwärmeeintrages auch in dem geringen Abstand der Probenlagerungen zueinander begründet.

Bedingt durch die trotz der relativen Entfernung zum Schweißlichtbogen vorhandenen elektromagnetischen Einflüsse, welche durch das Schweißen mit Impulslichtbo-

gen um ein Vielfaches verstärkt werden, erwiesen sich die zunächst verwendeten LVDT-Wegsensoren zur Feinwegmessung im Versuch als nicht ausreichend funktionsstabil. Eine einwandfreie Messung und Steuerung der Versuchseinrichtung war aufgrund der mangelnden Messgenauigkeit, verbunden mit dem zeitweiligen Ausfalls der Sensoren, nicht möglich. Als weiterhin nachteilig erwies sich die raue Arbeitsumgebung. Schweißspritzer, Rauche und Temperatur beeinflussen ebenfalls die Wegmessung. Um eine dennoch sichere und genaue Wegmessung zu gewährleisten, werden statt der auf Induktion basierend arbeitenden LVDT-Wegsensoren, Messsysteme auf Wirbelstrombasis eingesetzt. Das verwendete Wirbelstrom-Wegmesssystem vom Typ NCDT 3300® der Fa. Micro-Epsilon zeichnet sich durch eine hohe Genauigkeit (max. Messfehler 1 µm), eine hohe Abtastrate von 25 kHz sowie einer Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Einflüssen, Rauche und Temperatur aus. Als nachteilig muss jedoch der kleine Messbereich von 4 mm angesehen werden, der bei einer Bewegungsamplitude von ± 2 mm komplett ausgenutzt wird. Abb. 2.18 zeigt den vorhandenen Messaufbau bei auseinander gefahrenen Lagerschlitten. Der Wirbelstrom-Sensor ist stirnseitig am Lagerschlitten befestigt. Gemessen wird der Abstand zu einer auf den Sensor abgestimmten Blechplatte (Target). Während des Versuches bewegen sich der Lagerschlitten und damit der Sensor mit einer vorgegebenen Bewegungsamplitude um einen festgelegten Nullpunkt. Bei einem Messbereich von 4 mm und einer Bewegungsamplitude von max. 2 mm befindet sich die Nulllage des Sensors rd. 2 mm vor dem Targetblech. Dies lässt erkennen, dass das Sicherheitsspiel während des Schweißversuches quasi gegen Null geht, wird die maximal mögliche Bewegungsamplitude ausgenutzt. Infolge möglicher Regelungsungenauigkeiten bei Bewegungsamplituden nahe dem Maximum, würde somit der Wirbelstromsensor im ungünstigsten Fall auf das Targetblech aufschlagen, was zu einer Beschädigung des Messsensors selbst und im Extremfall der gesamten Prüfeinrichtung führen würde. Um dieser Gefahr zu begegnen, erfolgt die Lagerung des Targetblechs mittels einer speziell entwickelten Konstruktion federnd (Vorspannung 1500 N). Im Falle eines Aufpralls der Sensorhalterung auf das Targetblech gibt diese nach und löst zunächst nach 0,1 mm Stauchweg eine Vorwarnung, nach weiteren 0,1 mm eine Notabschaltung des Versuchstandes aus. Zum Abbremsen des Zylinders steht nach Auslösung des Notaus ein Restweg von 15 mm zur Verfügung. Gezielte Crashversuche haben gezeigt, dass der maximal auftretende Zylinderweg, nach Auslösung des Notastasters, rd. 9 mm beträgt.

Zur optimalen Wegmessung muss das Targetblech rechtwinklig zum Wirbelstromsensor ausgerichtet sein. Durch die speziell entwickelte Lagerung des Targetblechs ist ein Ausrichten um die Achsen der Targetfläche mittels Imbusschrauben möglich.

Das Verschweißen der Probenbleche unter Bewegung führt, bedingt durch die geometrische Exzentrizität bei Beginn der Schweißung, zur Entstehung eines, die Lagerkonstruktion der Probenhalterung beanspruchenden Versatzmomentes. Infolge der daraus resultierenden Beanspruchung kommt es zu einer Verdrehung des Lagerkörpers um die vertikale Achse, vgl. Abb. 2.18. Bei ausreichender Steifigkeit der Konstruktion oder geringer Kraftbeanspruchung ist die Größe der Lagerverdrehung zu klein, um eine nennenswerte Auswirkung auf die Parallelität der Schweißnahtflanken zueinander dar-

zustellen. Um jedoch eine Abschätzung des Fehlers aufgrund des Exzentrizitätsmomentes zu ermöglichen und zur regelungstechnischen Minimierung, erfolgt der Einbau von zwei Wirbelstromwegsensoren je Lastachse. Die Anordnung der Sensoren erfolgt in Verlängerung der Rollenschienenführungen, so dass sich die Auswirkung einer Verdrehung, bezogen auf die Probengeometrie, vergrößert darstellt (Strahlensatz).

Ein sicherer Betrieb der hydraulischen Komponenten des Versuchstandes macht eine stetige Überwachung der anstehenden Hydraulikdrücke unumgänglich. Zur ordnungsgemäßen Vorspannung der Hydraulikspeicher müssen die während des Betriebs der Versuchsanlage auftretenden Druckschwankungen bekannt sein. Aus diesen Anforderungen ergibt sich die Notwendigkeit zur Messung der Hydrauliköldrücke im Systemvor- und -rücklauf. Die verwendeten Druckmesssensoren vom Typ SCP 400® der Fa. Parker sind direkt unterhalb der Kolbenspeicher angeordnet und erlauben eine Druckmessung im Hauptstrom, vgl. Abb. 2.11. Der sichere Druckmessbereich erstreckt sich von 0 bis 400 bar, bei einer Druckspitzenanstiegsgeschwindigkeit von 15.000 bar/sec. Das Ausgangssignal wird als analoges Spannungssignal von 0 bis 10 Volt dargestellt.

Aufgrund der Notwendigkeit aufgenommene Messwerte gleichzeitig mehreren Anlagenkomponenten zur Verfügung zu stellen, erfolgt die Vernetzung der einzelnen Anlagenteile zentral, d.h. dass z.B. das Messergebnis eines Sensors zu einer zentralen Verteilerplattform geführt und dort für andere Anlagenteile bereitgestellt wird. Durch diese Maßnahme kann auf eine unübersichtliche und fehleranfällige dezentrale Netzstruktur verzichtet werden, was den Ausbau oder die Erweiterung des Versuchstandes technisch erleichtert. Abb. 2.19 zeigt die vollständig geöffnete zentrale Verteilerplattform. Das mittig angeordnete Netzteil dient zur Versorgung der Notausrelais sowie der Signalvervielfacher. Es ist hervorzuheben, dass der zur Abschaltung des Versuchstandes eingerichtete Notauskreis einer ständigen Funktionsüberwachung unterliegt. Die dazu notwendigen Notausrelais überprüfen zusätzlich bei jedem Hochfahren des Versuchstandes die Funktionalität des Notauskreises hinsichtlich Unterbrechung oder Kabelbruch.

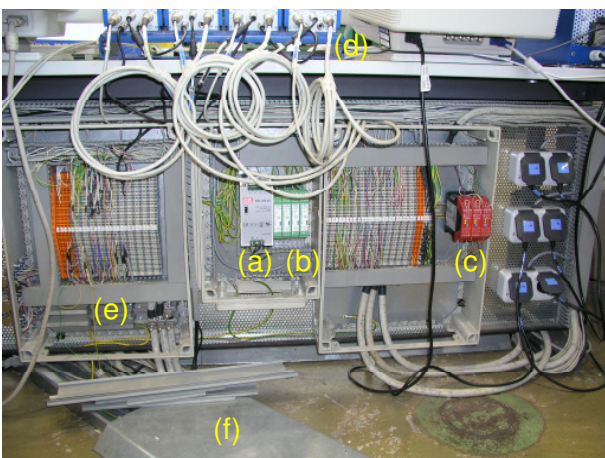


Abb. 2.19 Zentrale Verteilerplattform

- (a) Netzteil
- (b) Signalvervielfacher
- (c) Notausrelais
- (d) Messverstärker Wirbelstrom
- (e) Rangierklemmenverteiler
- (f) Zentraler Datenleitungskanal

2.3 Ansteuerung und Messdatenerfassung

Das Konzept der *Einknopfbedienung* (Kapitel 2.1) zur Versuchsdurchführung bedingt die Notwendigkeit einer übergeordneten Steuerstruktur (*Master*), welche die wesentlichen Teilkomponenten Hydraulik, Schweißsteuerung und Messwerteerfassung vereint und koordiniert. Wie aus Abb. 2.1 zu entnehmen, besteht eine umfangreiche Vernetzung der einzelnen Anlagen- und Regelungskomponenten untereinander sowie mit der zentralen Steuerung. Aufgabe der zentralen Steuerung ist die zeitliche Koordination und Überwachung der einzelnen Anlagenteile sowie die Echtzeiterfassung der während des Versuches anfallenden Messdaten. Zur besseren Übersicht werden nachstehend die Prozess- bzw. Programmstrukturen der wichtigsten Anlagenteile dargestellt. Auf eine detaillierte Darstellung der physikalischen Vernetzung der einzelnen Sensoren, Anlagenteile sowie Baugruppen wird verzichtet.

2.3.1 Versuchsaufbau und zentrale Steuerung

Die zentrale Steuerung des Versuchsaufbaues sowie die gleichzeitige Messwerteerfassung erfolgt über ein, in Zusammenarbeit mit der Fa. TAP, Bremen, eigens entwickeltes Mess- und Steuerprogramm, welches auf der LabView[®]-Entwicklungsumgebung basiert. Das in Abb. 2.20 dargestellte Flussdiagramm zeigt den vereinfachten Ablauf der Versuchsdurchführung bzw. -steuerung. In einem ersten Arbeitsschritt erfolgt das Einrichten des Versuchsstandes. Dies umfasst neben dem Einbau der Versuchskörper eine Anpassung der Regelungsparameter der Hydraulik- und der Schweißprozesssteuerung. In Abhängigkeit der zu untersuchenden Parameter erfolgt die Hinterlegung der hydraulischen Regelgrößen (Amplitude, Frequenz, Art der Regelung) im Steuerungsprogramm der MTS-Regelung. Bei Änderungen der Probengeometrie oder Schweißparameter sind zusätzliche Anpassungen am Schweiß- und Bewegungsprogramm des Roboters durchzuführen. Mit dem Abschluss der Versuchsvorbereitung werden die Regelungsprogramme zur Ansteuerung der Hydraulik (MTS-Regler) und des Schweißroboters gestartet. Diese versetzen den Versuchsstand in eine Ausgangsposition, von der aus der eigentliche Versuch gestartet wird, d.h. Roboter als auch die Lagerschlitten nehmen eine fest definierte Grundstellung ein. Mit dem Erreichen der Ausgangsposition werden durch die Regelungsprogramme digitale Ausgangssignale gesetzt, welche die Bereitschaft der Hydraulik bzw. des Schweißroboters zum Start des Versuches signalisieren.

Parallel zur Herstellung der Funktionsbereitschaft wird die zentrale Mess- und Steuerregelung auf dem Masterrechner gestartet. Abb. 2.21 zeigt die sich dem Bediener darstellende Benutzeroberfläche des zentralen Mess- und Steuerungsprogramms. Während der Initialisierung des Steuerprogramms erfolgt das Einlesen und Überprüfen der zuletzt gespeicherten Sensorkalibrierwerte. Gegebenenfalls notwendige Änderungen der Kalibrierfaktoren können direkt vor dem Anstarten des Versuches vorgenommen werden.

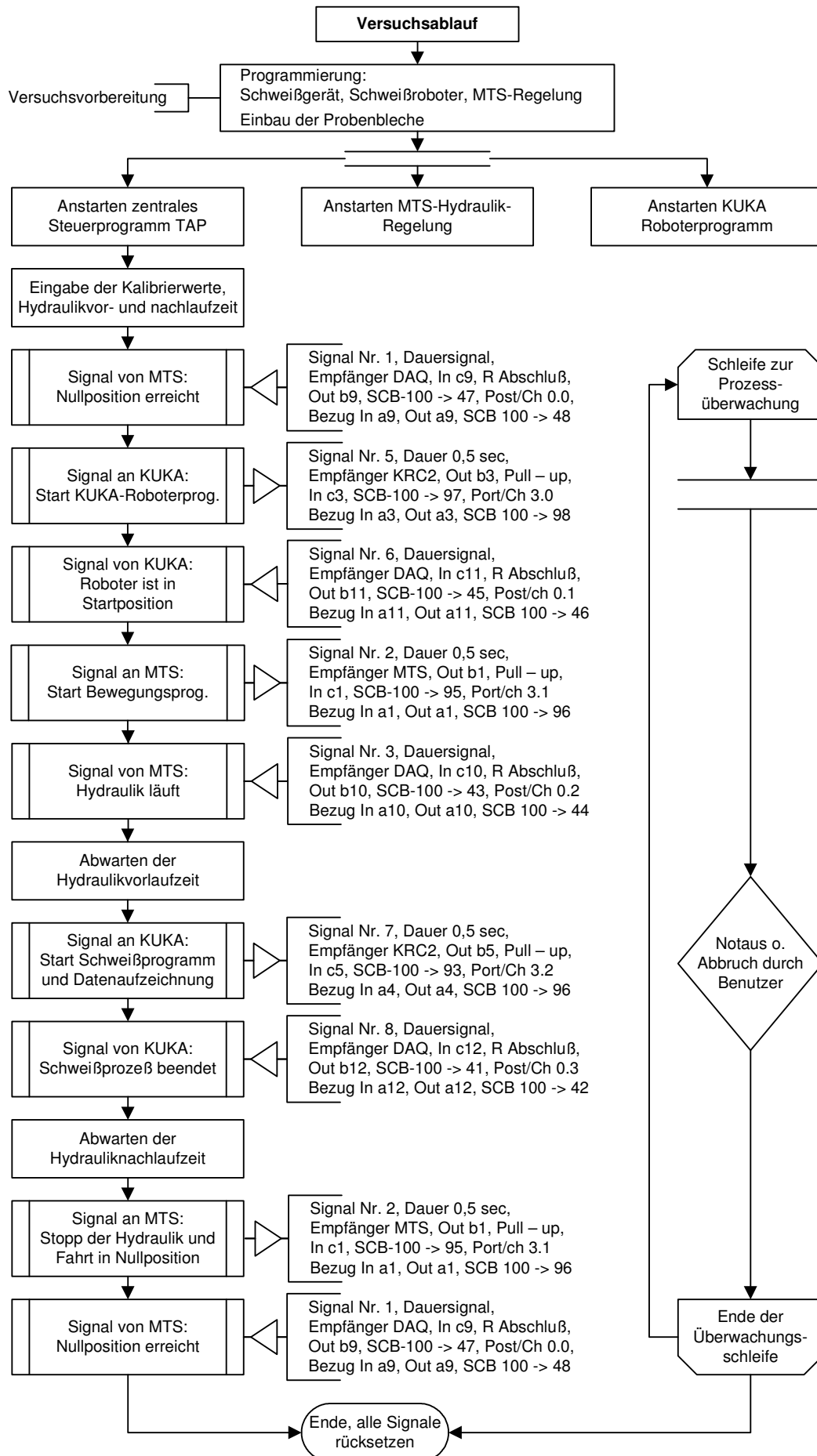


Abb. 2.20 Versuchsablaufplan der zentralen Mess- und Steuersoftware



Abb. 2.21 Benutzeroberfläche des zentralen Mess- und Steuerprogramms des Masterrechners

Nach der Festlegung des Speicherpfades für die Messdaten, der Sensorenabtastfrequenz und der Hydraulikvorlaufzeit wird der Versuch durch Tastendruck gestartet. Parallel zum Versuchsfortschritt erfolgt die laufend aktualisierte Darstellung der aufgenommenen Messdaten in jeweiligen Anzeigefeldern der Menüoberfläche des Masterrechners. Durch die Echtzeitdarstellung der Versuchdaten ist eine kontinuierliche Überwachung des Versuchsgeschehens möglich.

Mit dem Anstarten des Versuches übernimmt das zentrale Mess- und Steuerprogramm die vollständige Kontrolle des Versuchsablaufes. Nach der Kontrollabfrage des Vorliegens der Versuchsausgangsposition erfolgt das Starten des hydraulischen Regelprogramms sowie des Schweißroboters. Der Schweißroboter fährt zunächst aus seiner festgelegten Ausgangsposition (*Homeposition*) in eine Wartestellung, welche dem Startpunkt der Schweißung entspricht. Parallel dazu beginnt die hydraulische Regelung mit dem Abfahren des im Vorwege festgelegten Bewegungsprogramms. Nach Ablauf der Hydraulikvorlaufzeit sendet der Masterrechner ein Triggersignal an die Robotersteuerung zum Anstarten des Schweißprogramms, welches nach erfolgreicher Zündung des Schweißlichtbogens quittiert wird. Mit dem Beginn der Schweißung startet die zentrale Messdatenerfassung. Die anfallenden Messdaten werden von einer analogen Messkarte der Fa. National Instruments erfasst, zwischengespeichert und vom Mess- und Steuerprogramm in einer ASCII-Datei (Hauptdatei) auf der Festplatte des Master-

rechners abgelegt. Mit der Fertigstellung der Schweißnaht wird ausgehend von der Robotersteuerung ein digitales Dauersignal an den Masterrechner übermittelt, welches das Ende der Schweißung signalisiert. Ausgehend von diesem Steuersignal erfolgt nach Ablauf der Hydrauliknachlaufzeit das Setzen eines Triggersignals zum Stoppen der Hydraulik durch den Masterrechner. Nach dem Stoppen der Bewegung der Lagerschlitten werden diese in die Versuchsausgangsstellung gefahren und das Stoppsignal durch die Hydraulikregelung quittiert. Das Mess- und Steuerprogramm des Masterrechners beendet den Schweißversuch mit dem Zurücksetzen aller Steuerungssignale. Parallel zu dem beschriebenen Versuchsablauf erfolgt eine Prozessüberwachung. Diese hat die Aufgabe, bei Unregelmäßigkeiten im Versuchsablauf diesen zu stoppen (Notaus) oder beim Abbruch durch den Benutzer, den Versuchsstand in die Ausgangsposition zu versetzen.

2.3.2 Hydraulische Steuerung

Die Steuerung der hydraulischen Versuchsstandskomponenten (Zylinder) resultiert aus der gezielten Lenkung des Hydraulikölstroms mittels elektrisch betätigter Stetigventile (Servowegeventil, kurz *Servoventil*), vgl. Kapitel 2.2.3. In Verbindung mit einer auf die Servoventile zugeschnittenen Ansteuerelektronik sowie einer Multifunktionsregelung vom Typ Testar IIm[®] der Fa. MTS erfolgt die elektrische Ansteuerung der Ventile. Zur Programmierung des hydraulischen Bewegungsprogramms wird eine Regelungs- und Steuersoftware, **Multi Purpose Testing**[®] Software der Fa. MTS, kurz MPT, verwendet, welche eine direkte Programmierung des Multifunktionsreglers zulässt. Zusätzlich in den Multifunktionsregler integrierte digitale E-A-Module gestatten eine Integration der hydraulischen Steuerungselektronik in den Versuchsstand, so dass eine zeitliche Koordination der Hydraulik über den Masterrechner möglich ist.

Mit Beendigung der Versuchsvorbereitung erfolgt das Anstarten des hydraulischen Steuerungsprogramms MPT des Multifunktionsreglers. Der Programmablauf sowie die notwendigen Programmschritte sind in der Abb. 2.22 als Flussdiagramm dargestellt. Nach dem Abschluss der Initialisierung und Überprüfung der Steuerungselektronik können die notwendigen Regelungsparameter, wie z.B. Kraftbegrenzung, Wegamplitude, Frequenz, entsprechend den Anforderungen an den Versuch gesetzt und das Regelungsprogramm aktiv geschaltet werden. Vor der Ausführung des eigentlichen Bewegungsprogramms erfolgt eine Abfrage zur Verfügbarkeit der Servoventilsteuerungselektronik bzw. des Spannungs-/Stromstärkewandlers. Diese Prozedur dient der zusätzlichen Absicherung des Versuchsbetriebs. Nach der Quittierung durch den Benutzer werden die Lagerschlitten programmgesteuert in die Versuchsausgangsposition verfahren und das Wirbelstrom-Wegmesssystem aktiviert. Der Benutzer muss das Erreichen der Ausgangsposition ebenfalls manuell bestätigen, um das Regelungsprogramm abschließend, durch das Setzen eines digitalen Ausgangssignals, für die zentrale Steuerung durch den Masterrechner frei zu schalten. Durch den Empfang eines vom Masterrechner ausgehenden Triggersignals am digitalen Eingang der MTS-Steuerung wird das

Bewegungsprogramm zur Bewegung der Lagerschlitten gestartet. Ist das Bewegungsprogramm vorschriftsmäßig angelaufen, wird dieses über ein digitales Dauersignal dem Masterrechner angezeigt. Die Wegregelung der Lagerschlitten sowie deren softwareseitige Überwachung erfolgt gemäß den im Vorwege gemachten Parametersätzen. Dies gilt insbesondere für die Wegamplitude, die Frequenz, die Bewegungsform (sinus-, dreiecks-, rechtecksförmig) sowie die maximale Kraftbeanspruchung. Das hydraulische Bewegungsprogramm wird solange fortgesetzt, bis das hydraulische Steuerprogramm das Abbruchsignal vom Masterrechner erhält oder der Notaus ausgelöst wird. Im Falle des planmäßigen Versuchendes stoppt das hydraulische Steuerprogramm die Bewegung der Lagerschlitten und verfährt diese auf die Versuchsausgangsposition. Anschließend erfolgen das Zurücksetzen sämtlicher digitaler Steuersignale sowie das manuelle Entlasten der HSM-Einheiten. Zur Entlastung wird über die Testar Ilm-Regelung ein Steuersignal zu den HSM-Einheiten übermittelt, welches ein Schließen des Hydraulikvorlaufes bewirkt und den Hydraulikzulauf mit dem Rücklauf kurzschließt, so dass eine Entleerung der Kolbenspeicher in die Rückflussleitung möglich ist.

Das Auftreten einer technischen Störung, z.B. durch einen Systemausfall oder die versehentliche Eingabe falscher Steuerparameter, ist ein grundsätzliches Risiko beim Betrieb technischer Anlagen und muss daher bei der Planung soweit wie möglich berücksichtigt werden. Die reine softwaregesteuerte Überwachung des Betriebszustandes ist jedoch zur Wahrung der Sicherheit allein nicht ausreichend und konform zu den geltenden Vorschriften. Mechanische Vorwarn- und Notataster dienen im Fall einer hard- und/oder softwareseitigen Störung der hydraulischen Regelung, der zusätzlichen Absicherung des Versuchsstandes und seiner Bediener. In Bewegungsrichtung der Lagerschlitten sind daher stirnseitig neben den Sensoren des Wirbelstrom-Wegmesssystems mechanische Taster angeordnet (vgl. Abb. 2.18), die zunächst einen programmseitigen Voralarm und im Extremfall einen physikalischen Notaus auslösen. Das Auslösen des Voralarms führt zu einem Abbruch der durchgeführten Lagerbewegung und Rückkehr in die Versuchsausgangsposition. Von diesem Punkt ausgehend wird das eigentliche Bewegungsprogramm fortgesetzt. Ist die Ansteuerung der Hydraulik so fehlerhaft, dass eine softwareseitige Korrektur der Bewegung nicht mehr möglich ist, kommt es zur Auslösung des Notaus-Tasters, was zu einem Bewegungs- und Funktionsstopp aller Versuchsstandskomponenten incl. Roboter und Schweißgerät führt. Augenblicklich nach der Auslösung des Notaus wird der Zufluss des Hydrauliköls zu den Zylindern unterbrochen und dadurch die Lagerbewegungen schlagartig zum Stillstand gebracht. Die Verriegelung des Hydraulikzuflusses zu den Zylindern führt zu einem Kurzschließen des Hydraulikvor- und -rücklaufes und einer direkten Entleerung der Kolbenspeicher in die Rückflussleitung. Der durch das Notaus ausgelöste Systemhalt beendet alle laufenden Programmprozeduren. Ein Verfahren der Hydraulik ist erst nach Beseitigung der Störung möglich. Zusätzlich müssen die ausgelösten Notataster manuell per Schlüssel entriegelt werden, um ein unbeabsichtigtes Anfahren der Hydraulik auszuschließen.

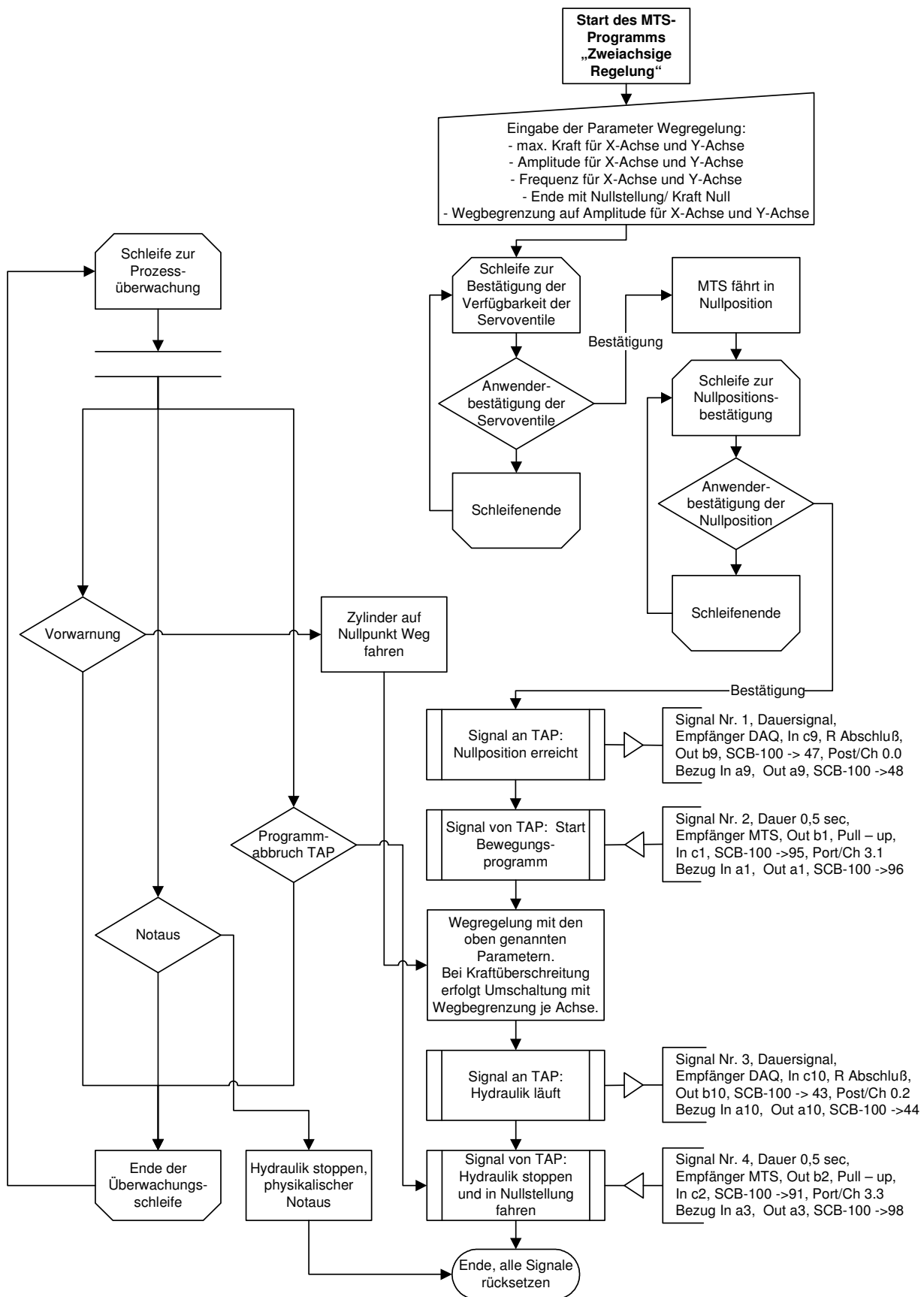


Abb. 2.22 Flussdiagramm des hydraulischen Steuerungsprogramms

2.3.3 Roboter- und Schweißsteuerung

Roboter und Schweißgerät bilden im Versuchstand eine in sich geschlossene Einheit. Die Ansteuerung des Schweißgerätes erfolgt durch das Steuerprogramm des Roboters, welches dem Schweißgerät über eine interne Datenschnittstelle mitteilt, welches Schweißprogramm bereitgestellt werden muss oder ob der Lichtbogen zünden oder erlöschen soll. Im Gegenzug teilt das Schweißgerät der Robotersteuerung die erfolgreiche Zündung des Lichtbogens oder einen auftretenden Fehler im Schweißprozess mit. Das Schweißprogramm selbst wird im Vorwege des Versuches in der Schweißstromquelle hinterlegt bzw. programmiert. Die Programmierung des Schweißprogramms beinhaltet u.a. Drahtvorschubgeschwindigkeit, Lichtbogenlänge, Start- und Endstrom sowie Pulsfrequenz und –ströme. Des Weiteren überwacht die Schweißstromquelle die vorgegebenen Schweißparameter und regelt diese bei Bedarf selbstständig nach. Die Kommunikation der Robotersteuerung mit dem übergeordneten Masterrechner erfolgt über digitale E/A-Module sowie ein analoges Ausgangsmodul (0 -10 V) zur Ausgabe der Lichtbogenposition.

Zu den Versuchsvorbereitungen gehört zunächst die Programmierung der Roboterbewegungen. Diese sind der jeweiligen Form, Größe und Lage der zu verschweißenden Probekörper anzupassen. Besonderes Augenmerk ist der Haltung des Schweißbrenners zur Schweißnaht zu widmen, da für die Art der Nahtgeometrie u. a. die Brennerführung entscheidend ist (schleppend, neutral, stechend). Ist die Bewegungsbahnprogrammierung abgeschlossen, sind umfangreiche Schweißversuche zur Auffindung der optimalen Schweißparameter angezeigt. Entsprechend dem Bewegungsablauf des Roboters sowie die Schweißergebnisse der Vorversuche den gewünschten Anforderungen, erfolgt das Anstarten des Robotersteuerungsprogramms. An dieser Stelle soll auf die enormen technischen Möglichkeiten der Roboterprogrammierung sowie der steuerungstechnischen Integration hingewiesen werden, auf eine detaillierte Darstellung wird jedoch aus Gründen des beschränkten Umfangs verzichtet. Der stark vereinfachte Programmablauf ist im nachstehenden Flussdiagramm der Abb. 2.24 zu entnehmen.

Nach der Aktivierung der Robotersteuerung wartet diese auf das Setzen des digitalen Eingangssignals durch den Masterrechner zum Start des Bewegungsprogramms. Mit dem Anstarten des Bewegungsprogramms werden die analogen Ausgänge zur Ausgabe der Lichtbogenposition aktiv geschaltet. Gleichzeitig erfolgen die Berechnung der Schweißbahnlänge und die Aufteilung der Bewegungsstrecke auf das mögliche analoge 0 bis 10 V – Signal. Der Roboter nimmt anschließend eine Warteposition am Startpunkt der Schweißnaht ein und zeigt dies dem Masterrechner durch einen Triggerimpuls an. Nach Ablauf der Hydraulikvorlaufzeit sendet der Masterrechner das Startsignal zum Schweißbeginn an die Robotersteuerung. Diese startet den Schweißprozess und leitet die Zündung des Lichtbogens per interne Kommunikation mit der Schweißstromquelle ein. Mit der erfolgreichen Zündung des Lichtbogens beginnt der Roboter die vorgegebene Schweißbahn unter Beachtung der programmierten Schweißgeschwindigkeit abzufahren. Ist das Ende der Schweißnaht erreicht, gibt die Robotersteuerung der Schweißstromquelle das Signal zur Beendigung des Schweißprozesses und zeigt dies,

durch Abgabe eines Triggersignals, dem Masterrechner an. Im Anschluss erfolgt die Deaktivierung der analogen Ausgänge zur Angabe der Lichtbogenposition und der Roboter kehrt in seine Ausgangsposition zurück. Den Abschluss des Steuerungsprogramms bildet das Zurücksetzen aller digitalen Signale auf den Ausgangszustand.

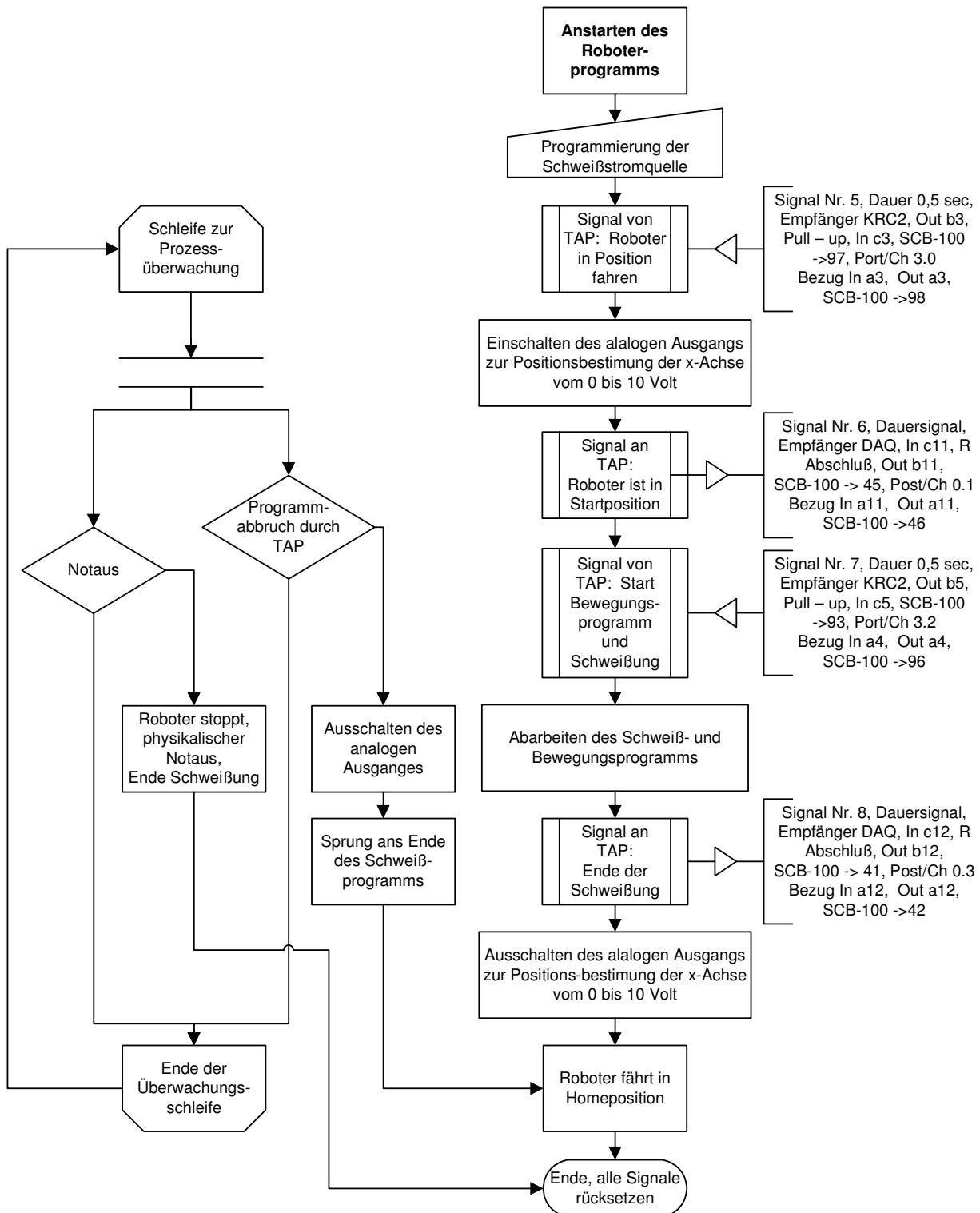


Abb. 2.23 Flussdiagramm der Steuerung des Schweißroboters

Parallel zur Steuerung des Schweiß- und Bewegungsprogramms findet eine permanente Sicherheitsüberwachung statt. Im Falle einer Komplikation wird durch Betätigung der Notausfunktion augenblicklich der gesamte Bewegungs- und Schweißprozess gestoppt. Dies bedeutet einen sofortigen Halt der Roboterbewegung, wobei in Abhängigkeit der momentanen Bewegungsgeschwindigkeit ein unterschiedlich langer Bremsweg zu berücksichtigen ist. Bei einer größtmöglichen Bewegungsgeschwindigkeit von rd. 2 m/sec beträgt der erforderliche Bremsweg trotz Notbremsung mehrere Zentimeter, was u. U. eine ernsthaft Gefährdung des Bedienpersonals bedeuten kann. Dies lässt auch die Problematik bei der Konzeption eines vollautomatisierten Versuchstandes erkennen.

Das „planmäßige“ Abbrechen des Schweißversuches durch die Steuerung des Masterrechners führt zu einer sofortigen Beendigung des Schweißprozesses sowie der analogen Datenausgabe. Der Roboter fährt in diesem Fall die vorgegebene Bewegungsbahn ohne Schweißung ab und kehrt in die Ausgangsposition zurück. Den Abschluss bildet das Zurücksetzen der digitalen Ein- und Ausgänge.

Kapitel 3

Schweißversuche unter einachsiger Nahtflankenbewegung

3.1 Allgemeine Überlegungen zur Versuchskonzeption

Die derzeit gültigen Regeln und Normen gehen davon aus, dass eine technisch einwandfreie Schweißung nur erreicht werden kann, solange sich die zu verschweißenden Bauteile in Ruhe befinden. Liegt eine Relativverschiebung der Bauteile zueinander vor, so ist eine Schweißung nach dem derzeitigen Stand des Wissens nicht zulässig, da es infolge der Nahtflankenbewegungen zu einer Schädigung der Schweißnaht kommt, welche die Tragfähigkeit der Verbindung herabsetzt. Um dennoch das einwandfreie Verschweißen derartiger Bauteile zu gewährleisten, sind zum Teil erhebliche konstruktive Maßnahmen erforderlich, welche die zu verschweißenden Bauteile in ihrer Position zueinander fixieren und entlasten. Als nachteilig muss bei dieser Vorgehensweise jedoch angesehen werden, dass es neben den Kosten für die Entlastungskonstruktion zu Nutzungseinschränkungen des Bauwerks kommen kann, was wiederum zu zusätzlichen wirtschaftlichen Einbußen führt. Die Schaffung der Möglichkeit des Schweißens von Bauteilen unter Betriebsbeanspruchungen stellt daher eine wirtschaftlich interessante Alternative zu den herkömmlichen Verfahren dar und kann überall dort vorteilhaft eingesetzt werden kann, wo eine Fixierung der Bauteile nur unter größtmöglichem Aufwand erfolgen oder die Bewegung der Nahtflanken nicht unterbunden werden kann. Typische Anwendungsfälle sind im Brücken- und Offshorebau sowie bei der Sanierung bestehender Konstruktionen zu finden, die einer dynamischen Beanspruchung ausgesetzt sind, welche nicht unterbunden werden kann.

Grundlegendes Ziel der experimentellen Untersuchungen ist die Bestimmung der technisch sinnvollen Grenzen, innerhalb derer, in Abhängigkeit der Bewegungsamplitude und Frequenz, ein Verschweißen von Bauteilen möglich ist. Erste Hinweise zur Machbarkeit einer Schweißung unter gleichzeitiger Bewegung der Nahtflanken sind in den Untersuchungen von SCHIEBEL [1998] und VALTINAT/ANSORGE [1995] zu finden. Jedoch können diese nicht befriedigen, da das untersuchte Parameterfeld zu klein ist, um zu einer verwertbaren Aussage hinsichtlich der Eigenschaften und Machbarkeit einer unter Betriebsbeanspruchung hergestellten Schweißnaht zu gelangen. Gleichwohl geben die gemachten Untersuchungen Hinweise über mögliche Grenzen, innerhalb derer eine Schweißung bei vorgegebener Spaltöffnungsamplitude und Bewegungsfrequenz möglich ist.

Grundsätzlich muss unterschieden werden, ob die zu verschweißenden Bauteile eine vollständige Trennung voneinander aufweisen oder ob diese in Teilen noch miteinander verbunden sind. Im Falle des Zusammenfügens von einzelnen Bauteilen oder Segmenten, z.B. im Brückenbau, liegt eine vollständige Trennung vor, wohingegen bei Reparaturschweißungen, beispielhaft sei der Brückenhänger der Elbbrücke Dömitz genannt (vgl. Kapitel 1), nur eine teilweise Trennung durch einen Anriss vorliegt. Um eine Aussage über die Auswirkungen von Nahtflankenbewegungen auf die Schweißnahtgüte treffen zu können, wurden zwei Versuchsreihen mit unterschiedlichen geometrischen Randbedingungen durchgeführt.

Untersucht wurden zunächst MAG-Einlagenschweißungen in Wannenlage an Versuchskörpern aus S355J2G3 (DIN EN 10025) mit einer Blechstärke von 6 mm. Die Probekörper wiesen zunächst keine Verbindungen zueinander auf, so dass ein Verbindungsschweißen von zwei vollständig getrennten Bauteilen unter Bewegung der Nahtflanken simuliert wurde. Im Fokus der Untersuchung stand die einachsige, quer zur Schweißnaht gerichtete Beanspruchung der Proben, welche in reiner Wegregelung mit gleich bleibender Bewegungsamplitude der schweißnahtfernen Probenränder und Frequenz über die gesamte Versuchsdauer erfolgte. Dieses Vorgehen entspricht dem für die Schweißnaht ungünstigsten Belastungsfall, da es im realen Bauwerk zu einer Reduktion der Nahtflankenbewegung infolge elastischer Verformungen des zu verschweißenden Bauteils kommt. Die auftretende Bewegungsamplitude und damit die Dehnungen verteilen sich auf die lokalen Bereiche des Tragwerks. Eine Verbindungs- oder Reparaturschweißung an einem real belasteten Bauteil würde dazu führen, dass vorhandene Kräfte über die bereits verschweißten Bereiche abgetragen werden können. Infolge des damit verbundenen Steifigkeitszuwachses kommt es zu einer Reduzierung der Nahtflankenbewegung. Die Bewegungen streben dabei einem Grenzwert entgegen, welcher im Idealfall zu Null wird und somit einer Schweißung in Ruhe entspricht.

Einen weiteren Schwerpunkt der durchgeführten Schweißversuche bilden die Untersuchungen zum Verschweißen von Rissen in bestehenden Konstruktionselementen. Wie bereits dargestellt kann es infolge dynamischer Beanspruchungen zu einem Auftreten von Anrissen an besonders exponierten Bauteilen, z.B. im Brücken- oder Offshorebau, kommen. Das Stoppen des Risswachstums sowie die Verstärkung der betroffenen Bauwerksteile stehen bei einer Sanierung im Vordergrund. In der Regel werden derartige Schäden rechtzeitig erkannt, so dass ein kompletter Durchriss und damit Totalausfall des Bauteils verhindert werden kann. Das bisherige Sanierungskonzept sieht ein Ausfügen der Risse und Verschweißen in Ruhe vor. Dies ist jedoch nicht immer möglich, so dass hier ein Verschweißen unter „atmenden“ Rissflanken erfolgen muss. In einer zweiten Versuchsserie wurden daher Untersuchungen an Blechproben durchgeführt, die eine Reparatur der beschriebenen Risscharakteristika unter Bewegung simulieren sollen. Dazu wurden 10 mm starke Probenbleche aus S355J2G3 mit einer 6 mm tiefen, V-förmigen Nut versehen. Die Nut simuliert den bereits für die Schweißung ausgefugten Anriss im Bauteil. Das Verschweißen der Nut erfolgt, analog zur ersten Versuchsserie, unter einer einachsigen, quer zur Schweißnaht gerichteten Beanspruchung in reiner Wegregelung.

Für die Verwertbarkeit der Ergebnisse aus den durchgeführten Schweißversuchen ist entscheidend, dass diese eine größtmögliche Reproduzierbarkeit beinhalten. Störgrößen, welche als solche nicht erkennbar sind, könnten im ungünstigsten Fall zu falschen Schlussfolgerungen führen. Die Forderung nach Reproduzierbarkeit bedingt somit die Notwendigkeit einer vollautomatischen Versuchsdurchführung, welche frei von menschlichen Störgrößen ist. Mit Blick auf die in der Praxis üblichen Schweißverfahren wurde für die experimentelle Untersuchung das MAG-Schweißen mittels Roboter gewählt. Implementiert in einen vollautomatisierten Versuchstand ist ein Verschweißen der Versuchskörper ohne von außen eingebrachte Störgrößen möglich. Die Konzeption sowie der Aufbau des Versuchstandes, inklusive aller Steuerungs- und Messdatenerfassungsprogramme, ist dem Kapitel 2 zu entnehmen.

3.2 Schweißversuche bei zunächst vollständiger Bauteiltrennung

3.2.1 Versuchsbeschreibung

3.2.1.1 Werkstoffe und Probengeometrie

Die Notwendigkeit, Bauteile bei gleichzeitiger Bewegung der Nahtflanken zu verschweißen, besteht vorrangig im Brücken- und Offshorebau sowie bei der Sanierung bestehender Konstruktionen. Um eine Übertragung der Versuchsergebnisse auf die Praxis zu ermöglichen, orientiert sich die Wahl des Werkstoffes für die Schweißproben an den im Brücken- und Offshorebau eingesetzten Stahlgüten. Zur Herstellung der Probenbleche wurde ein Baustahl S355J2G3 gemäß den Anforderungen nach DIN EN 10025 verwendet. Das verwendete Blechmaterial stammt aus einer Stahlcharge und weist die in Tabelle 3.1 angegebene chemische Zusammensetzung auf.

Die im Rahmen der Schweißversuche verwendeten Blechproben weisen die in Abb. 3.1 dargestellte Geometrie auf. Aufgrund der erhöhten Anforderungen hinsichtlich der Maßtoleranzen erfolgte das Herausarbeiten der Blechproben aus vorgeschrittenen Blechplatten (370 x 370 x 6 mm) mittels CNC-Fräsung. Um eine schlupffreie Verbindung der Probenbleche mit den Lagerschlitten des Versuchsrahmens bzw. den Paßbolzen zu garantieren, wurden die 13 Halterungsbohrungen je Probenblech als Presspassung ausgeführt, so dass eine spielfreie Lagerung sichergestellt ist. Der erhöhte Aufwand für die Probenherstellung begründet sich in der Anforderung, dass eine aufgebrachte Be-

Tab. 3.1 Chemische Zusammensetzung des Probenmaterials S355 J2G3 in %

C	Si	Mn	P	S	N	Al	Cu	Cr
0,140	0,342	1,567	0,012	0,003	0,0038	0,038	0,012	0,043
Ni	Mo	As	Sn	Ti	V	Nb	Ca	B
0,034	0,008	0,004	0,004	0,002	0,004	0,001	0,0008	0,0001

wegungsamplitude nicht im Lagerspiel der Prüfmaschine aufgezehrt werden darf. Andernfalls wäre eine Zuordnung zwischen Ursache und Wirkung nicht mehr zweifelsfrei möglich, da eine definierte Wegbeanspruchung der Probe nicht gewährleistet werden kann. Der Öffnungswinkel der Schweißnahtfuge beträgt 45° und wurde nach Auswertung diverser Schweißvorversuche festgelegt. Die Nahtvorbereitung ist V-förmig mit einem Flankenwinkel von 22,5° (Ausbildung der Fase) und besitzt einen Reststeg mit einer Höhe von 1,0 mm, vgl. Abb. 3.2. Der Stegabstand betrug 1,0 mm, so dass eine Berührung der Probenbleche infolge der aufgebrachten Bewegungsamplituden ausgeschlossen werden konnte. Herstellungsbedingt wiesen die Probenbleche Rückstände von Kühlmittel/-öl auf, so dass vor dem Einbau der Versuchskörper in den Prüfraum ein gründliches Entfetten und Reinigen der Proben zwingend erforderlich war.

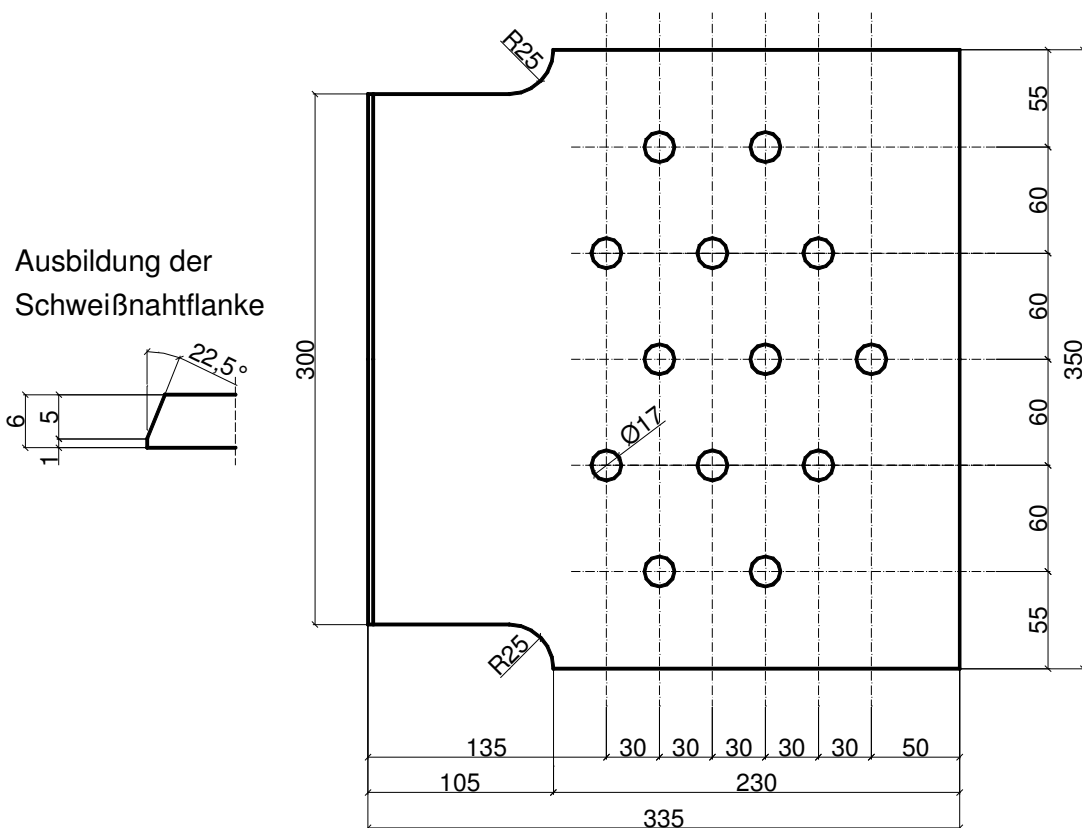


Abb. 3.1 Probengeometrie Versuchsbleche $t=6\text{mm}$, Öffnungswinkel der Nahtvorbereitung 45°

3.2.1.2 Schweißverfahren und –parameter

Das Verschweißen der Probenbleche erfolgte mittels Schweißroboter als automatisierte MAG-Schweißung (**M**etall-**A**ktiv**g**as-Schweißen). Die Wahl des verwendeten Schweißverfahrens orientierte sich an der Forderung, dass zum Zwecke der Reproduktion eine Automatisierung des Verfahrens möglich sein musste und dieses für die Praxis Bedeutung besitzt. Während der Schweißversuche wurden sämtliche Schweißparameter konstant gehalten. Dem sich darstellenden Ergebnis liegen somit einheitliche Bedingungen zugrunde, was einen direkten Vergleich der Versuche miteinander erlaubt. Um die Auswirkungen der Nahtflankenbewegungen bzw. der unterschiedlichen Frequenzen auf die Nahtgüte darzustellen, erfolgte eine Optimierung der Schweißparameter für den Fall der in Ruhe geschweißten Blechprobe. Für die durchgeführten Schweißungen wurde eine Schweißdrahtelektrode $\text{Ø}1,2\text{ mm}$ vom Typ DIN EN 440 – G 50 3 M G4Si1 (Markenname Oerlikon CARBOFIL 1A[®]) unter Mischgas M21 (18% CO_2 , 82% Argon) verschweißt. Der verwendete Schweißzusatzwerkstoff stammt aus einer Charge und weist die in Tabelle 3.2 angegebene chemische Zusammensetzung auf. Die Schutzgasmenge wurde nach der Faustregel „Drahtdurchmesser (in mm) mal zehn = Schutzgasmenge (l/min)“ zuzüglich 3 l/min ausgelegt, so dass die Gesamtschutzgasmenge sich zu 15 l/min ergab.

Tab. 3.2 Chemische Zusammensetzung der Drahtelektrode

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu	Al
0,080	0,957	1,670	0,009	0,008	0,031	0,003	0,010	0,001

Für den Schweißprozess stand eine vollkommen digitalisierte, mikroprozessorgesteuerte Inverterstromquelle vom Typ Trans Synergic 5000 Comfort® der Firma Fronius zur Verfügung, welche steuerungs- und messtechnisch in den Versuchstand integriert wurde, vgl. Kapitel 2. Um einen nahezu spritzerfreien Schweißprozess zu gewährleisten, wurde von der Möglichkeit des Schweißens im Impulslichtbogen Gebrauch gemacht. Die Pulsfrequenz während des Schweißprozesses betrug 140 Hz bei einer mittleren Stromstärke von 150 A und einer Schweißspannung von 23,7 V. Der eingestellte Drahtvorschub betrug 5,2 m/min. Zur Gewährleistung des sicheren Zündens des Schweißlichtbogens wurde das Schweißprogramm der Stromquelle in der Art modifiziert, dass der Startstrom zu Beginn der Schweißung einen Wert von 135% des eigentlichen Schweißstromes annahm. Nach erfolgreicher Zündung erfolgte das rampenförmige Absenken des Schweißstromes auf den vorgegebenen Prozesswert. Analog diesem Vorgehen wurde der Schweißstrom zum Nahtende rampenförmig auf einen Wert von 35% des Prozesswertes abgesenkt, um eine Füllung des Endkraters zu erreichen.

Neben der Bestimmung der Schweißparameter zur Steuerung der Schweißstromquelle ist die Kenntnis der Schweißgeschwindigkeit für den Erfolg der Schweißung entscheidend. Die theoretisch maximal mögliche Geschwindigkeit, mit welcher der Schweißbrenner über das Werkstück geführt werden kann, orientiert sich u.a. an der Drahtfördergeschwindigkeit und dem damit pro Zeiteinheit maximal möglichen einzubringenden Schweißgutvolumen. Wird eine 100%ige Füllung des Nahtspaltes sowie eine leichte Nahtüberhöhung bzw. eine sichere Erfassung der Nahtwurzel gefordert, so entspricht dies der Gleichheit des Volumenstroms von zugeführtem Draht und zu füllendem Spalt:

$$A_{Dr} \cdot v_{Dr} = A_{Sp} \cdot v_S \quad (3.1)$$

Nach der Schweißgeschwindigkeit v_S aufgelöst ergibt sich:

$$v_S = \frac{A_{Dr} \cdot v_{Dr}}{A_{Sp}} \quad (3.2)$$

Die geometrischen Verhältnisse zur Berechnung der zu füllenden Spaltfläche sind in Abb. 3.2 dargestellt. Die Gesamtpaltfläche A_{Sp} setzt sich aus den Anteilen der Nahtüberhöhung, dem Wurzeldurchhang sowie dem Bereich zwischen den Probenblechen zusammen.

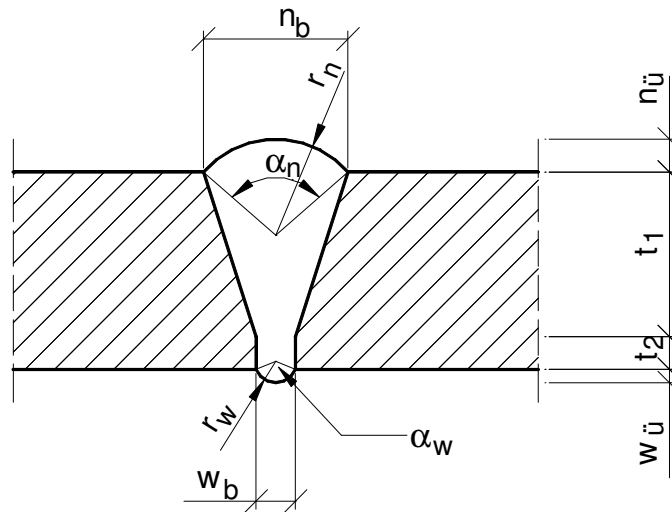


Abb. 3.2 Geometrie des Schweißspaltes

Für die Gesamtspaltsfläche A_{Sp} ergibt sich:

$$A_{Sp} = \left(\frac{r_n^2}{2} \cdot \left(\pi \cdot \frac{\alpha_n}{180} - \sin(\alpha_n) \right) \right) + \left(\frac{n_b + w_b}{2} \cdot t_1 \right) + (w_b \cdot t_2) + \left(\frac{r_w^2}{2} \cdot \left(\pi \cdot \frac{\alpha_w}{180} - \sin(\alpha_w) \right) \right) \quad (3.3)$$

Durch das Einsetzen der Gl. (3.3) in Gl. (3.2) sowie der Bestimmung der Drahtelektrodenquerschnittsfläche folgt abschließend für die theoretisch mögliche Schweißgeschwindigkeit:

$$v_s = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot d_{Dr}^2 \cdot v_{Dr}}{\left(\frac{r_n^2}{2} \cdot \left(\pi \cdot \frac{\alpha_n}{180} - \sin(\alpha_n) \right) \right) + \left(\frac{n_b + w_b}{2} \cdot t_1 \right) + (w_b \cdot t_2) + \left(\frac{r_w^2}{2} \cdot \left(\pi \cdot \frac{\alpha_w}{180} - \sin(\alpha_w) \right) \right)} \quad (3.4)$$

Die Auswertung der Gl. (3.4) liefert als Anhaltswert, unter Berücksichtigung der gewählten Nahtfugengeometrie sowie einer Nahtüberhöhung $n_{\bar{u}}$ von 1,0 mm und einer Wurzelüberhöhung $w_{\bar{u}}$ von 0,5 mm, eine maximale Schweißgeschwindigkeit von 29 cm/min. Durchgeführte Testschweißungen im Rahmen der Optimierung zeigten jedoch, dass der so ermittelte Wert unter realen Bedingungen zu groß ist und es zu keiner vollständigen Auffüllung des Nahtspaltes kommt. Ursächlich hierfür dürften Massenverluste aus Schweißspritzern, Abbrand, etc. sowie geometrische Ungenauigkeiten sein. Für die Schweißversuche wurde daher die Schweißgeschwindigkeit auf einen Wert von 27 cm/min reduziert, was jedoch mit der theoretisch möglichen Geschwindigkeit sehr gut übereinstimmt.

Die Geometrie des Schmelzbades sowie die Steuerung des Einbrandes werden durch die bereits angesprochenen Schweißparameter beeinflusst. Eine zusätzliche Beeinflussung kann durch die Orientierung des Schweißbrenners erfolgen. Eine schlep-

pende Brennerführung erzeugt einen tieferen Einbrand und einen größeren Nahtaufbau, wohingegen eine stechende Brennerführung zu einem flacheren Einbrand und einer geringeren Nahtüberhöhung führt. Im Rahmen der durchgeführten Schweißversuche wurde einer neutralen Brennerführung der Vorzug gegeben, d.h. der Schweißbrenner befand sich in einer senkrechten Orientierung zur Blechebene. Der Brennerabstand zur Oberfläche der Probekörper betrug rund 12 mm.

3.2.1.3 Parameterfeld der Bewegungsamplitude und Frequenz

Aus den von SCHIEBEL [1998] veröffentlichten Forschungsergebnissen ergibt sich, dass ein Verschweißen von Blechen mittels Handschweißung bei einer Spaltöffnungsamplitude von maximal $\pm 0,75$ mm und Frequenzen von bis zu 1,0 Hz grundsätzlich möglich ist. Die von SCHIEBEL durchgeführten Untersuchungen ergaben, dass es infolge der Nahtflankenbewegungen zu einer Rissentstehung innerhalb der Schweißnaht kommt. Angaben über das Bauteilverhalten sowie die sich darstellende Schweißnahtqualität bei größeren Bewegungsamplituden und Frequenzen liegen nicht vor. Um eine Aussage hinsichtlich der Machbarkeit einer technisch sinnvollen Schweißung bei gleichzeitiger Nahtflankenbewegung machen zu können, wurde ein Versuchsprogramm erstellt, welches ein systematisches Abschweißen von Probenblechen bei verschiedenen großen Bewegungsamplituden und Frequenzen vorsah. Vorrangiges Ziel bei der Parameterfelderstellung war die Verfeinerung des von SCHIEBEL untersuchten Bereichs so-

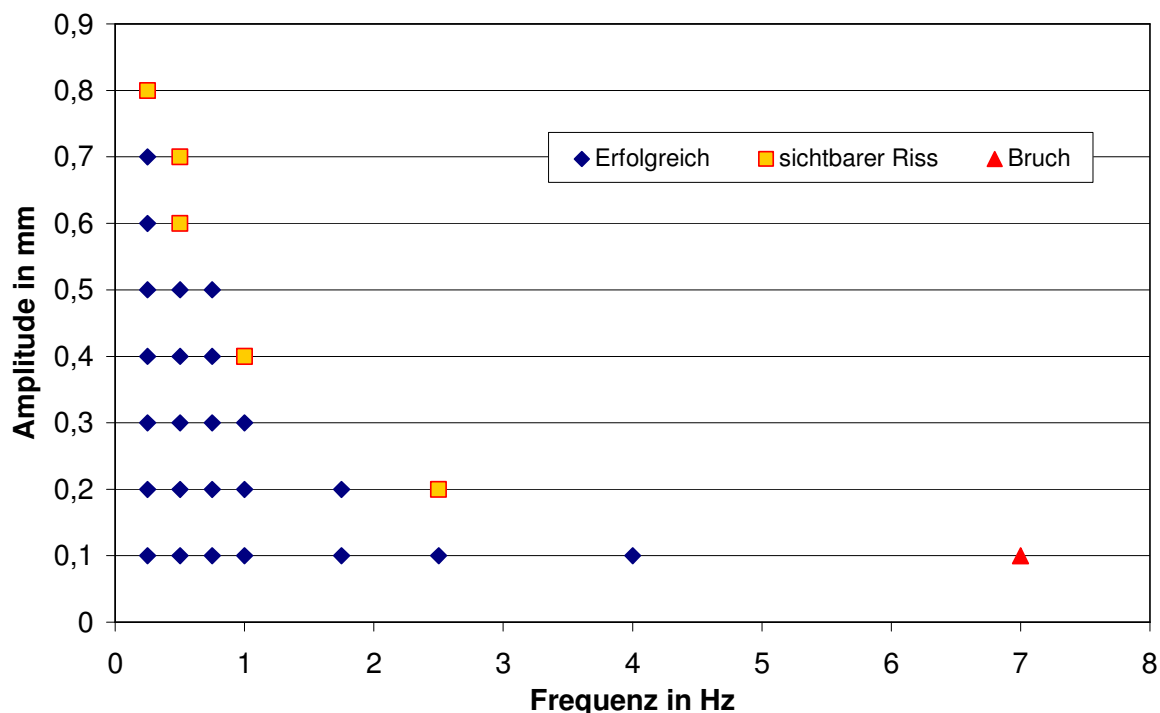


Abb. 3.3 Parameterfeld der Schweißversuche, Probenzustand vor dem Ausbau aus dem Versuchsrahmen

wie dessen Erweiterung zu größeren Bewegungsamplituden und Frequenzen. Aufgrund der mangelnden Kenntnis über die Möglichkeiten eine sichere Schweißverbindung bei größeren Bewegungsamplituden bzw. höheren Frequenzen zu erzielen, wurden zur Eingrenzung des Parameterfeldes Testschweißungen bei unterschiedlichen Bewegungsamplituden und Frequenzen durchgeführt. Anhand dieser Testversuche konnte das zu untersuchende Parameterfeld auf Bewegungsamplituden bis $\pm 0,80$ mm und Frequenzen kleiner 7,0 Hz eingegrenzt werden. Des Weiteren zeigten die Testschweißungen, dass eine geringfügige Erhöhung der Bewegungsfrequenz im Bereich bis 1,0 Hz zu einem überproportionalen Abfall der noch während des Schweißens aufnehmbaren Bewegungsamplitude führt. Zur genauen Bestimmung des Verlaufes der Grenz Bewegungsamplitude in Abhängigkeit der Bewegungsfrequenz erfolgte eine Verfeinerung des Parameterfeldes bis zu einer Frequenz von 1,0 Hz. Getestet wurden insgesamt 8 Versuchsserien bei unterschiedlichen Frequenzen (0,25 Hz, 0,50 Hz, 0,75 Hz, 1,0 Hz, 1,75 Hz, 2,5 Hz, 4,0 Hz und 7,0 Hz). Die Bewegungsamplitude während des Schweißens variierte je Serie von $\pm 0,1$ mm bis $\pm 0,8$ mm. Insgesamt wurden 30 verschiedene Parameterkombinationen in den durchgeführten Schweißversuchen berücksichtigt, vgl. Abb. 3.3.

3.2.2 Referenzschweißung ohne Nahtflankenbewegung

Zur Klärung der Frage, welche Auswirkungen eine Bewegung der Nahtflanken während des Schweißprozesses auf die Nahtgüte bzw. das Bauteil hat, ist es notwendig, sich auf eine Referenzschweißung ohne Bewegung der Nahtflanken zu beziehen. Insgesamt wurden drei Schweißversuche in Ruhe durchgeführt und deren Ergebnisse für einen Vergleich herangezogen. Die Versuchsbedingungen der Referenzschweißung entsprachen in allen Punkten, mit Ausnahme der Nahtflankenbewegung, denen der späteren Schweißversuche unter Bewegung. Nach der Montage der Versuchskörper auf den Lagerschlitten des Versuchsrahmens wurden diese in die Versuchsausgangsposition gefahren. Während des Verschweißens der Probekörper blieben die Lagerschlitten in der Ausgangsposition fixiert, so dass analog zu den Schweißversuchen unter Bewegung Zwängungskräfte infolge thermischer Dehnungen aufgenommen und gemessen wurden.

Abb. 3.4 zeigt exemplarisch die Kraftentwicklung während des Schweißversuches. Die Schweißprobe unterliegt zunächst einer Zugkraftbeanspruchung, deren Maximum rund 25 Sekunden nach dem Beginn des Schweißprozesses erreicht wird. Infolge der durch den Schweißprozess eingebrachten Wärme kommt es zu einer örtlich stark begrenzten Ausdehnung der Probenbleche. Aufgrund mangelnder Festigkeit des Schmelzbades sowie der bereits eingebrachten Schweißnaht wird diese durch das sich lokal ausdehnende Probenblech plastisch gestaucht. Das Probenblech unterliegt während der ersten Sekunden einer geringfügigen Druckbeanspruchung. Im weiteren Verlauf der Schweißung kühlt die bereits eingebrachte Schweißnaht ab und zieht sich zusammen. Es entstehen Zugspannungen, welche durch die thermische Dehnung der

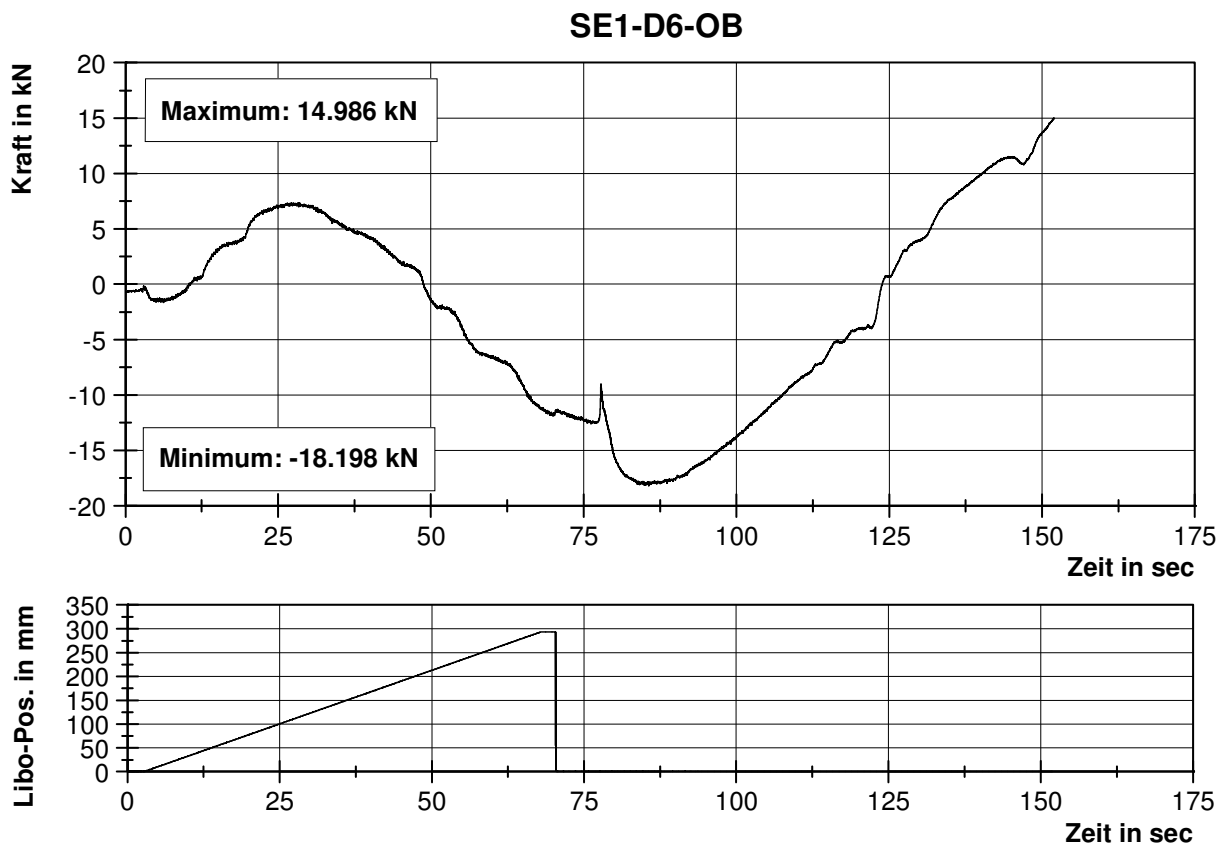


Abb. 3.4 Kraftentwicklung während des Versuches einer in Ruhe geschweißten Probe

Probenbleche nicht kompensiert werden können. Grund für den mangelnden Ausgleich der Kräfte ist die, dem Schweißlichtbogen nachlaufende Wärmefront, welche sich ähnlich der Kielwelle eines Schiffes, in das Probenblech ausbreitet und zunächst nur kleine Bereiche der Blechprobe erwärmt. Die infolge der Erwärmung auftretenden thermischen Dehnungen sind anfänglich so gering, dass ein Überdrücken der Zugspannungen nicht möglich ist. Mit dem Fortschreiten des Schweißprozesses erfolgt ein Vorrücken der Wärmefront in das Probenblech und damit eine Erwärmung der Schweißprobe über größere Bereiche. Der daraus resultierende Zuwachs der Druckkraftkomponente führt zu einer Verlangsamung der Zugkraftsteigerung und schließlich zum Abbau der Zugkraft im Probenblech. Wie aus der Abb. 3.4 erkennbar, steigt die Druckkraftbeanspruchung im Probenblech kontinuierlich an und erreicht rund 17 Sekunden nach Beendigung des Schweißprozesses ein Maximum. Die Vergrößerung der Druckkraft über das Schweißende hinaus gründet sich in dem zeitlichen Versatz der nachlaufenden Wärmeausbreitung im Probenblech und den damit verbunden thermischen Dehnungen. Nach dem Erreichen des Maximums erfolgt infolge der Abkühlung des Versuchskörpers ein Abbau der Druckkraft bis die Schweißprobe erneut unter einer Zugkraftbeanspruchung steht.

3.2.3 Auswertung der Schweißversuche und Zusammenfassung

3.2.3.1 Auswertung der Schweißversuche unter Bewegung bei anfänglicher Trennung der Probenbleche

Die Ansteuerung der Lagerschlittenbewegung und damit die Beanspruchung der Versuchsbleche erfolgten in reiner Wegregelung über die gesamte Versuchsdauer. Frequenz und Amplitude der Bewegung entsprachen den im hydraulischen Steuerungsprogramm hinterlegten Parameterdaten. Ebenfalls im Steuerungsprogramm festgelegt wurde die Figur der Bewegung. Sämtlichen durchgeführten Versuchen lag ein sinusförmiger Bewegungsablauf zugrunde. Für die Qualität der aufgetragenen Beanspruchung ist entscheidend, dass die Nahtflanken eine größtmögliche Parallelität während des Versuches zueinander aufweisen. Wie in Kapitel 2 dargelegt, wurde bei der Konstruktion und Ausführung der Versuchseinrichtung größter Wert auf Präzision und Steifigkeit bei der Schlittenführung gelegt. Dieser Ansatz spiegelt sich auch in den aufgezeichneten Wegverläufen der Wirbelstrom-Wegsensoren wieder. Abb. 3.5 zeigt beispielhaft die gemessenen Verläufe der Bewegungsamplituden rechts und links des Probekörpers während eines Schweißversuches. Die dem dargestellten Versuch zugrunde gelegten Steuerungsparameter sahen eine Bewegungsamplitude von $\pm 0,6$ mm bei einer

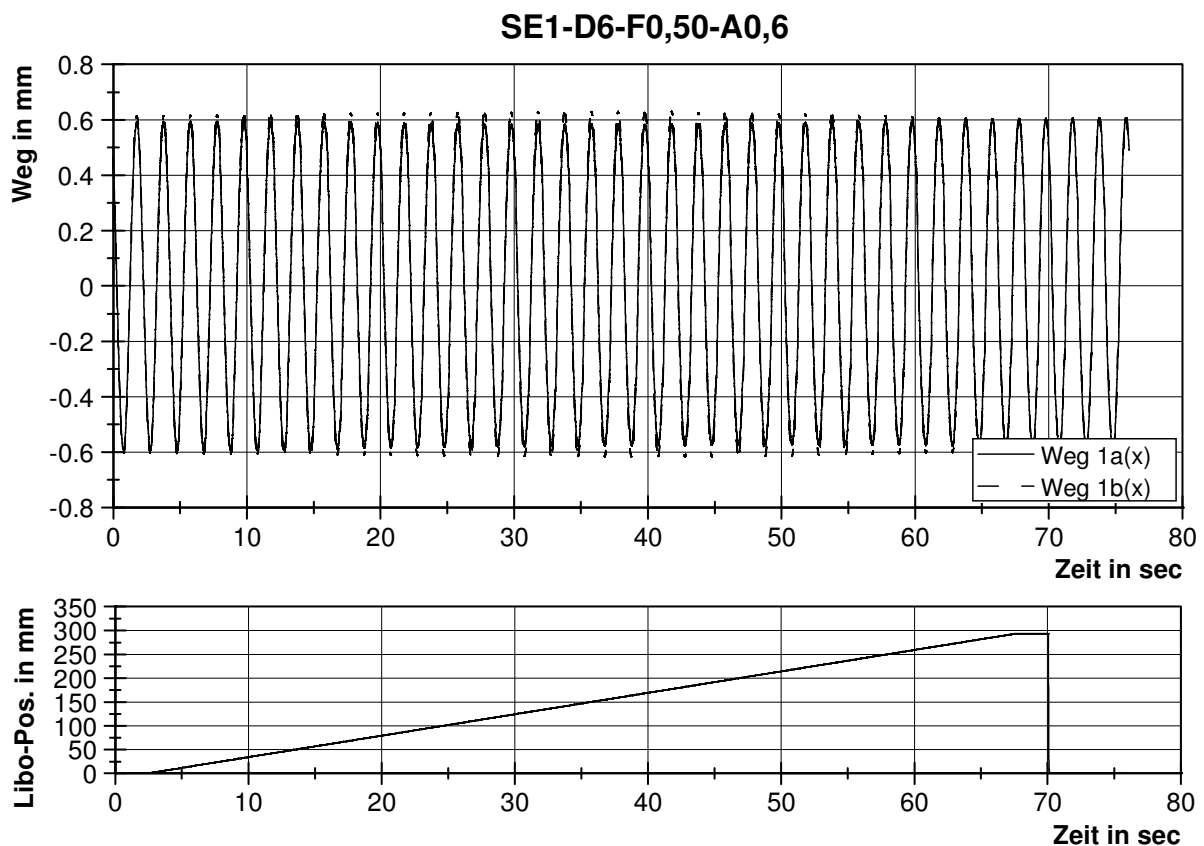


Abb. 3.5 Verlauf der Bewegungsamplituden über die Versuchsdauer gemessen an den Seiten der Probenbleche

Frequenz von 0,5 Hz vor. Deutlich erkennbar ist die präzise Einhaltung der Wegvorgabe. Beide Wegverläufe weisen nur kleinste Über- bzw. Unterschreitungen bei der Einhaltung der geforderten Bewegungsamplitude auf. Abweichungen zwischen den Verläufen der einzelnen Wegsensoren sind praktisch nicht erkennbar, was eine Verdrehung der Lagerschlitten zueinander ausschließt. Die Forderung nach einer Einhaltung der Nahtflankenparallelität sowie einer gleich bleibenden Spaltöffnungsamplitude über die gesamte Versuchsdauer hinweg kann somit als gegeben angesehen werden. Damit

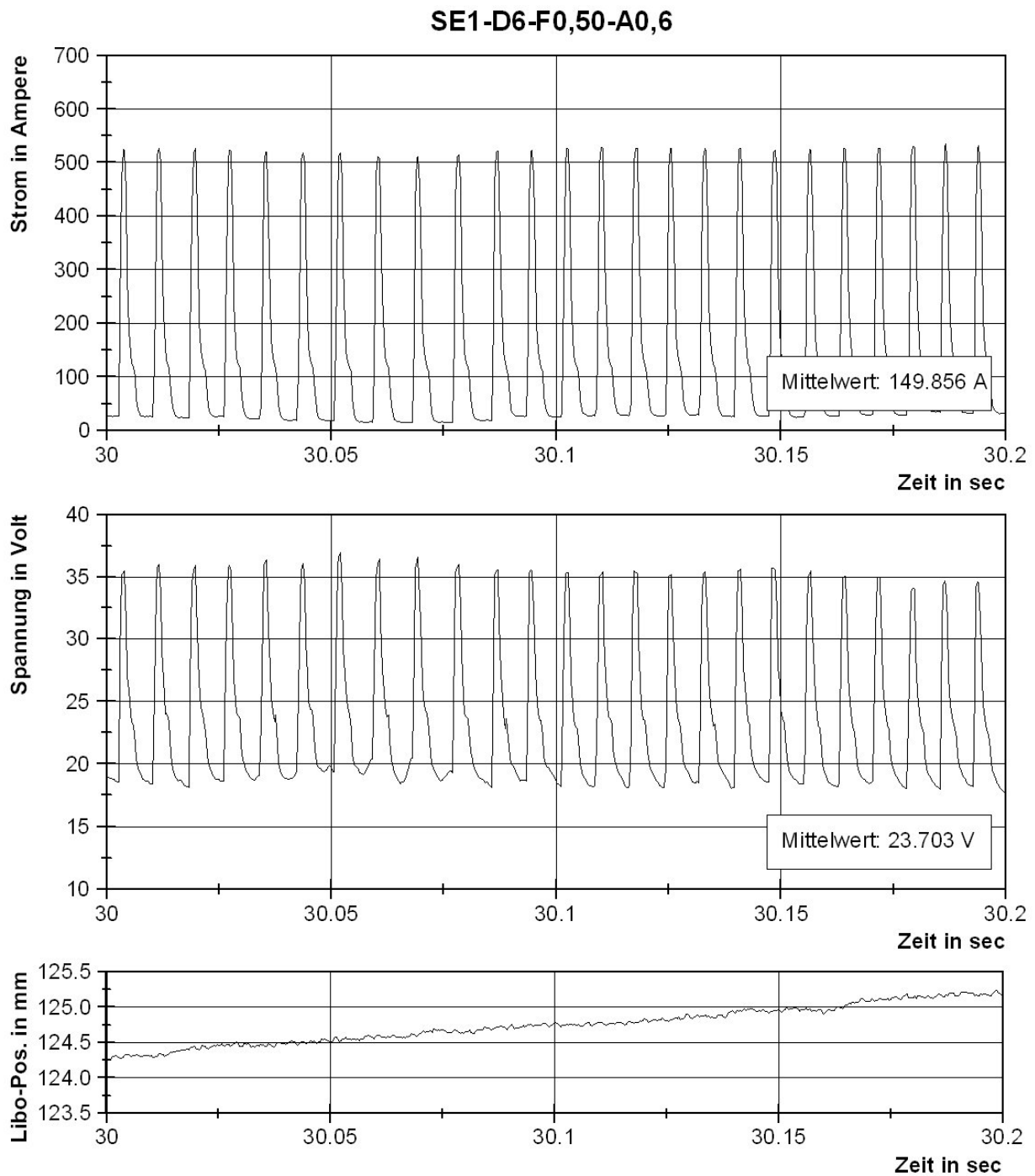


Abb. 3.6 Exemplarischer Ausschnitt des Schweißstrom/-spannungsverlaufs über die Zeit

unterscheiden sich die Forschungsergebnisse dieser Arbeit grundsätzlich von den Ergebnissen bereits durchgeführter Untersuchungen [SCHI 1998, VALT 1999].

Das Verschweißen der Probenbleche erfolgte mittels einer, durch einen Schweißroboter automatisierten MAG-Schweißung im Impulslichtbogen. Der Vorteil dieses Verfahrens ist u.a. im kurzschlussfreien Tropfenübergang beim Abschmelzen der Drahtelektrode zu sehen. Ferner kann durch die Wahl der Pulsfrequenz die Tropfengröße beim Abschmelzen der Drahtelektrode beeinflusst werden, was eine Optimierung des Schweißprozesses mit Blick auf die Nahtflankenbewegung erlaubt. Eine Realtime-messung der Strom- und Spannungsverläufe während des Schweißversuches gestattet eine lückenlose Dokumentation und Überwachung des Schweißprozesses. Durch die gleichzeitige Aufzeichnung der Lichtbogenposition, welche sich aus den Steuerungsdaten des Roboters berechnet, ist eine Zuordnung der Schweißparameter hinsichtlich Zeit und Ort möglich. Abb. 3.6 zeigt exemplarisch einen Ausschnitt aus den während eines Versuches aufgenommenen Strom- und Spannungsverläufen. Deutlich zu erkennen sind die einzelnen Strom- und Spannungsimpulse, in deren Folge die Drahtelektrode aufgeschmolzen und die Tropfenablösung initiiert wird. Eine nähere Auswertung des gesamten Strom-/Spannungsverlaufes zeigt, dass es während der Versuchsdurchführung zu keinerlei Spannungseinbrüchen gekommen ist, so dass von einem kurzschlussfreien und damit spritzerarmen Tropfenübergang ausgegangen werden kann. Die sich aus den Messungen ergebenden Mittelwerte für Strom und Spannung entsprechen den am Schweißgerät voreingestellten Werten.

Während der Versuchsdurchführung unterliegt die Steifigkeit der Schweißprobe einer stetigen Veränderung. Ausgehend von einer Nullsteifigkeit der Probe zu Beginn des Versuches kommt es mit zunehmendem Schweißfortschritt zu einer Steifigkeitserhöhung, welche ihr Maximum zum Versuchsende erreicht. Die zunächst in zwei Teilen vorliegende Blechprobe besitzt aufgrund der fehlenden Kraftübertragung zwischen den Blechteilen keine Steifigkeit. Eine Regelung der Hydraulik in Kraftregelung ist zu diesem Zeitpunkt ausgeschlossen. Die Steuerung der Hydraulik und damit der Beanspruchung der Probe kann ausschließlich in Wegregelung erfolgen. Mit dem Zünden des Schweißlichtbogens und dem Einbringen der Schweißnaht entsteht eine Verbindung zwischen den Blechteilen, welche in Abhängigkeit der aufgetragenen Wegamplitude mehr oder weniger stark beanspruchbar ist. Parallel zum fortschreitenden Schweißprozess setzen die Erstarrung des Schmelzbades sowie die Abkühlung der bereits abgeschweißten Nahtbereiche ein. Infolge der Abkühlung kommt es zu einer Erhöhung der Nahtfestigkeit und des E-Moduls im Schweißnahtbereich. Dies ermöglicht eine Kraftübertragung zwischen den Probenblechen, wodurch die Steifigkeit der Probe ansteigt. Der vorläufige Höhepunkt des Steifigkeitszuwachses ist mit Fertigstellung der Schweißnaht und dem Erlöschen des Lichtbogens erreicht. Nun folgende Steifigkeitszuwächse resultieren einzig aus der Steigerung des E-Moduls infolge der Abkühlung des Versuchskörpers.

Das aufgezeigte Verhalten der Schweißprobe spiegelt sich analog in der Kraftentwicklung während des Schweißversuches wider. Durch die aufgetragene Wegamplitude werden Druck- und Zugkräfte in der Schweißprobe erzeugt, welche, ausgehend vom Wert Null, den Maximalwert am Ende der Datenaufzeichnung erreichen. Abb. 3.7 zeigt

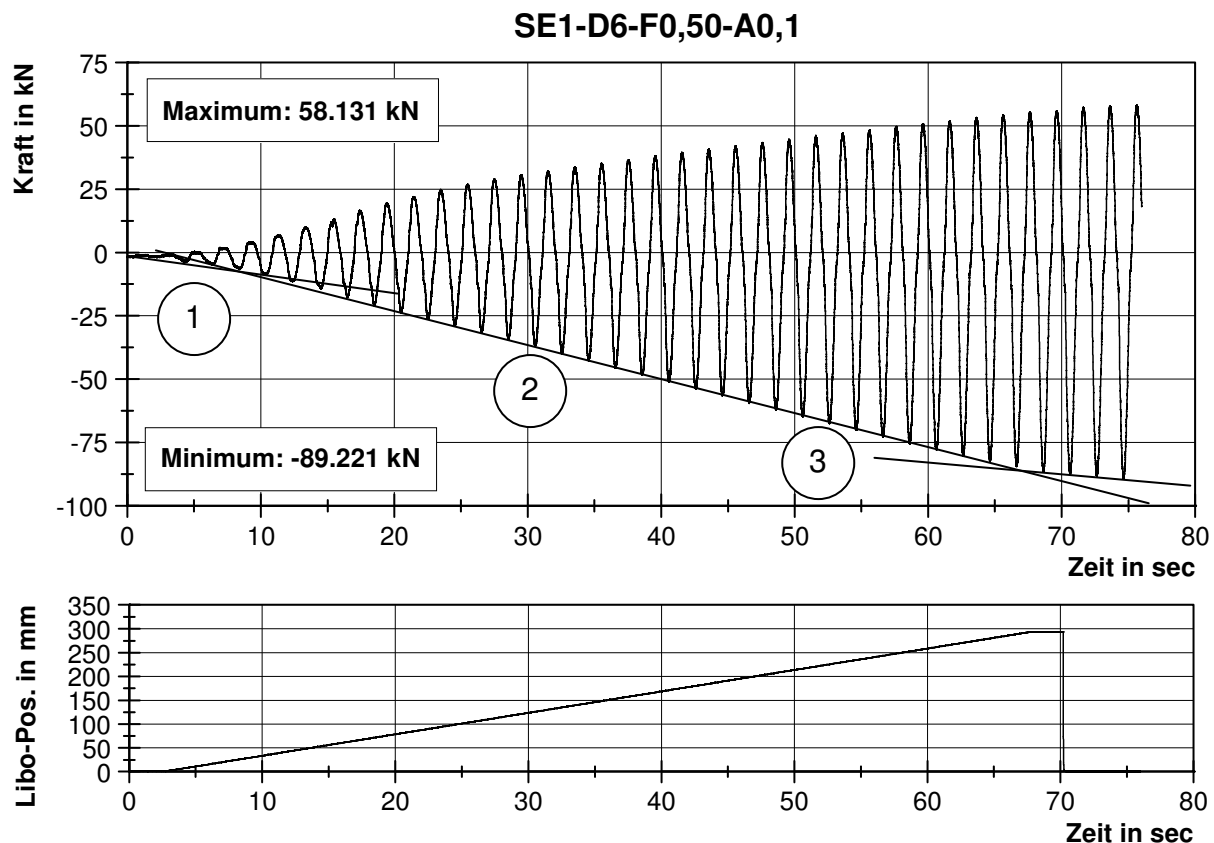


Abb. 3.7 Kraftentwicklung unter einer Amplitude von $\pm 0,1$ mm und einer Frequenz von 0,5 Hz

exemplarisch die Kräfteentwicklung über den Zeitraum des Schweißversuches unter einer Bewegungsamplitude von $\pm 0,1$ mm und einer Frequenz von 0,5 Hz. Bei näherer Betrachtung der zeitlichen Kraftentwicklung können drei unterschiedliche Entwicklungsbereiche unterschieden werden. Nach der Zündung des Lichtbogens und dem Start des Schweißprozesses kommt es zur Bildung eines Schmelzbades sowie der Erwärmung des noch kalten Probenbleches. Zu Beginn der Schweißung (Bereich 1) fließt die durch den Schweißprozess eingebrachte Wärme zügig in das noch kalte Blechmaterial ab, wodurch es zu einer raschen Erstarrung der Schweißschmelze kommt. Infolge dieses Vorganges steigt die Kraft überproportional an, bis sich ein, in Abhängigkeit der Schweißgeschwindigkeit, quasi stationärer Wärmezustand im Versuchskörper einstellt. Innerhalb des Bereichs 2 bewirkt die quasi stationäre Wärmeverteilung im Versuchskörper eine gleich bleibende Ausbildung der Schmelzbadgeometrie und damit einen linearen Kräftezuwachs infolge der Schweißnahterstarrung bzw. Abkühlung. Die Wärmefront läuft ähnlich der Kielwelle eines Schiffes dem Lichtbogen hinterher. Mit dem Erlöschen des Lichtbogens strebt die Wärmeverteilung im Versuchsblech einem Ausgleich entgegen. Steifigkeitszuwächse hervorgerufen durch die Einbringung zusätzlichen Nahtmaterials finden nicht mehr statt. Ausschließlich die Steigerung des E-Moduls infolge der Abkühlung des Versuchskörpers trägt zur Erhöhung der Steifigkeit und damit der Kraft bei, was eine geringere Steigung des Kraftanstieges zur Folge hat (Bereich 3).

Hysteresen von SE1-D6-F0,5-A0,1

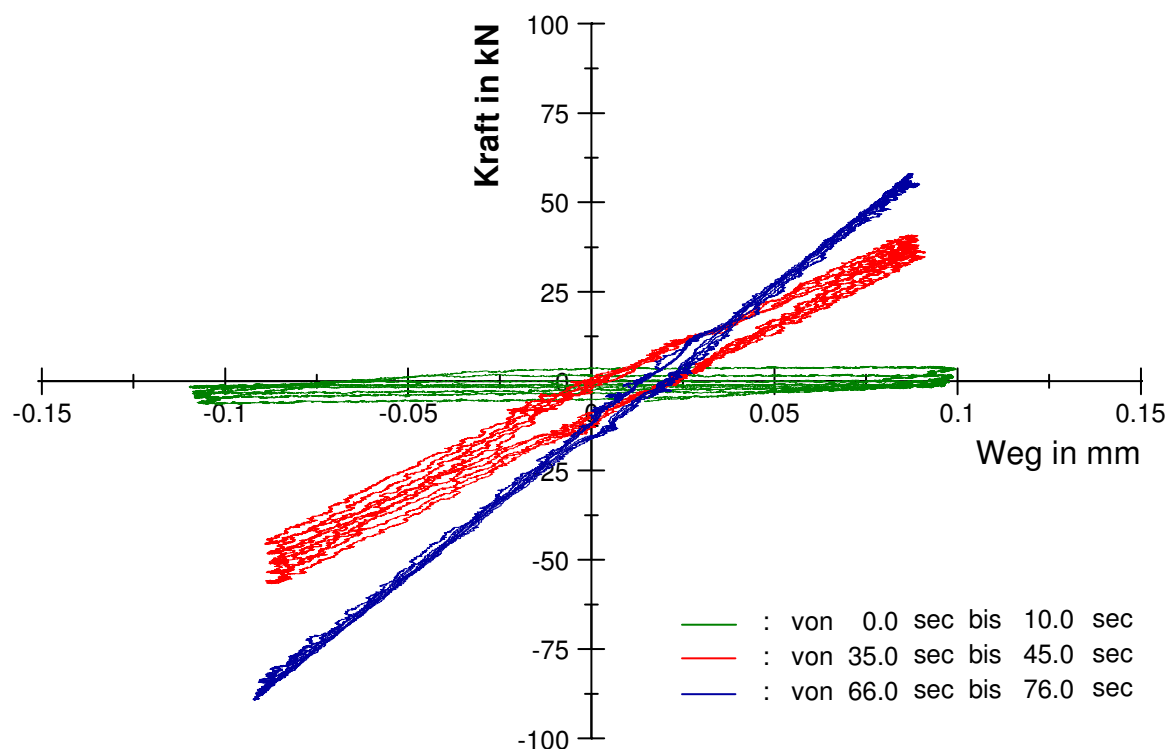


Abb. 3.8 Hysteresenentwicklung bei einer Bewegungsamplitude von $\pm 0,1$ mm und einer Frequenz von 0,5 Hz

Eine genauere Betrachtung der Kraftentwicklung zeigt, dass sich die während des Schweißversuches einstellenden Zug- und Druckkräfte hinsichtlich ihres Maximalwertes sowie des Kraftanstieges unterscheiden, vgl. Abb. 3.7. Deutlich erkennbar sind der größere Kraftanstieg im Druckbereich, das vorzeitige Abflachen der Kraft im Zugbereich sowie die Verschiebung der Kraftamplituden in den Druckbereich. Dieser Sachverhalt wird besonders deutlich, erfolgt eine Darstellung der Kraft über der aufgetragenen Bewegungsamplitude. Die sich ergebenden Hysteresenverläufe sind für eine Bewegungsamplitude von $\pm 0,1$ mm und eine Frequenz von 0,5 Hz in Abb. 3.8 dargestellt. Zur besseren Übersicht wurden jeweils 10 Sekunden der Kraft-Weg-Beziehung am Versuchsbeginn, zur Versuchsmitte sowie am Versuchsende dargestellt. Deutlich erkennbar sind, in Abhängigkeit des Schweißfortschrittes, die Zunahme der Zug-/Druckkräfte sowie die Verschiebung der Hysteresen in den Druckbereich. Zum Zeitpunkt der Beendigung des Schweißprozesses beträgt die Verschiebung der Hysteresen zum Druckbereich 12,5 kN. Die vom Schweißfortschritt und damit zeitlich abhängige Verschiebung der Hysteresen in den Druckbereich kann mit Blick auf den sich während einer Schweißung in Ruhe und bei starrer Lagerung darstellenden Kraftverlauf erklärt werden. Wie aus der Abb. 3.5 ersichtlich, weist der Kraftverlauf einer in Ruhe hergestellten Schweißnaht zum Zeitpunkt des Schweißprozessendes eine Druckbeanspruchung des Versuchskörpers von rd. 12,5 kN auf. Dieser Wert entspricht genau der Kraftverschiebung,

welche sich im Hysteresenverlauf der Abb. 3.8 darstellt. Die infolge der thermischen Dehnungen des Versuchskörpers auftretenden Druckkräfte führen zu einer Vergrößerung der Gesamtdruckkraft und damit zu einem steileren Kraftanstieg im Druckbereich. Bedingung für die Gültigkeit dieses Ansatzes ist die Behinderung der thermischen Ausdehnung der Probenbleche während der Versuchsdurchführung. Die im Rahmen der durchgeführten Schweißversuche unter Bewegung der Nahtflanken aufgebrachte Beanspruchung erfolgte durch eine oszillierende Bewegung der Lagerschlitten um einen Fixpunkt, wodurch eine Dehnungsbehinderung der Probenbleche unterstellt werden kann.

Der Einfluss der Bewegungsamplitude auf die beim Schweißprozess auftretenden Kräfte und deren Entwicklung ergibt sich aus einem direkten Vergleich zwischen den Schweißversuchen gleicher Frequenz aber unterschiedlicher Größe der Nahtflankenbewegung während des Schweißens. Eine Gegenüberstellung der Kraftentwicklung, exemplarisch unter einer Bewegungsfrequenz von 0,5 Hz, zeigt, dass es mit wachsender Bewegungsamplitude zu einem kontinuierlichen Anstieg der erreichbaren Zug- und Druckkräfte kommt, vgl. Abb. 3.9. Die sich infolge der sich vergrößernden Bewegungsamplitude einstellende Erhöhung der Kraftmaxima resultiert aus der steigenden Dehnung der Schweißnaht bzw. des Versuchsbleches. Eine nähere Betrachtung des Kraftverlaufes lässt erkennen, dass der Kraftanstieg bis zu einer Bewegungsamplitude von $\pm 0,3$ mm, mit einer Kraftdifferenz von rd. 25 kN, nahezu parallel verläuft. Als Grund für diese Differenz können die Auswirkungen der thermischen Dehnung infolge der Versuchskörpererwärmung durch den Schweißprozess angesehen werden, vgl. vorstehende Ausführungen.

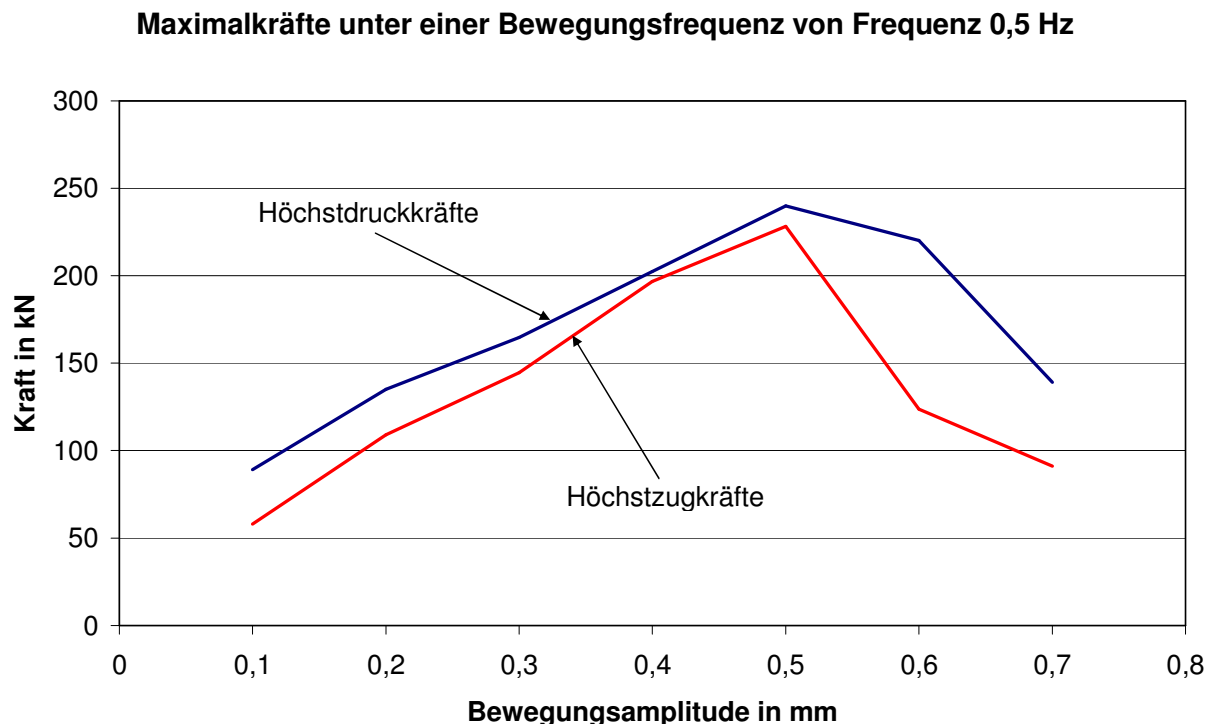


Abb. 3.9 Verlauf der maximalen Höchstzug- und -druckkräfte bei einer Frequenz von 0,5 Hz zum Zeitpunkt des Schweißendes

Durch die weitere Steigerung der Bewegungsamplitude kommt es zu einer Annäherung der Maximalkraftverläufe, bis diese ein Maximum erreichen. Effekte aus thermischer Dehnung treten gegenüber der größer werdenden Bewegungsamplitude in den Hintergrund. Die Verschiebung der Kraftamplituden in den Druckbereich geht zurück, was zu einer zunehmenden Symmetrie der sich während des Versuches darstellenden Kraftverläufe führt. Beispielhaft ist dieses Verhalten für eine Bewegungsamplitude von $\pm 0,5$ mm in Abb. 3.10 dargestellt. Ursächlich für die Annäherung der Kraftverläufe scheinen Einflüsse aus Plastizierung und Rissbildung im Bereich der Schweißnaht zu sein. Abb. 3.11 zeigt die sich während des Schweißversuches unter einer Bewegungsamplitude von $\pm 0,5$ mm darstellenden Hysteresenverläufe. Ein Vergleich mit der Hysteresenausbildung unter einer kleinen Bewegungsamplitude (Abb. 3.8) lässt die zunehmende plastische Ausprägung der Hysteresenform infolge der größer werdenden Bewegungsamplitude erkennen. Die über den Versuchsverlauf zunehmend konkave Ausbildung der Hysteresenform resultiert aus der integralen Betrachtung über die Versuchsprobenbreite der sich örtlich und zeitlich verändernden Probensteifigkeit. Eine genaue Zuweisung vorliegender Steifigkeitseinflüsse aus der Temperaturabhängigkeit des Werkstoffes sowie der Rissentstehung infolge der Probenbeanspruchung ist jedoch anhand der durchgeführten Versuche nicht möglich.

Wie aus der Abb. 3.9 zu erkennen, kommt es, nach dem Erreichen des Maximums der Höchstkraftverläufe zu einer Divergenz des Zug-/Druckkraftverlaufs sowie einem verstärkten Abfall der beim Schweißversuch erzielten Höchstkräfte. Eine genauere Betrachtung der zu diesem Punkt hergestellten Schweißproben zeigt, dass die Schweißnähte in Nahtmitte Anrisse aufweisen, welche bereits mit bloßem Auge, ohne Verwendung von Hilfsmitteln, erkennbar sind. Dieser Sachverhalt lässt den Schluss zu, dass eine Übertragung von Kräften über den vollen Schweißnahtquerschnitt nur während der Druckbeanspruchungsphase infolge von Risssschließungen und damit der Übertragung durch Kontaktkräfte möglich ist. Im Falle einer Zugbeanspruchung der Schweißprobe kommt es zu einem Öffnen der Risse, was eine Kraftübertragung ausschließlich über den Restquerschnitt der Schweißnaht erlaubt. Das beschriebene Verhalten spiegelt sich in den während der Schweißversuche aufgezeichneten Kraft- und Hysteresenverläufen wider. Der in Abb. 3.12 für eine Bewegungsamplitude von $\pm 0,6$ mm dargestellte Kraftverlauf zeigt ein vorzeitiges Abflachen der Zugkraft im Versuchsverlauf, was auf das Vorhandensein von Rissen schließen lässt. Des Weiteren weist der Kraftverlauf nach rd. 60 bzw. 70 Sekunden leichte Einbrüche im Zugkraftbereich auf, die auf ein lokales Versagen der Schweißverbindung hindeuten. Abb. 3.13 zeigt die sich aus dem Kraftverlauf darstellenden Hysteresenverläufe. Deutlich zu erkennen ist die plastische Ausprägung der Hysterese sowie ein, gegenüber dem Druckbereich, geringerer Anstieg der Zugkraftentwicklung. Aus diesem Sachverhalt kann geschlossen werden, dass die in der Schweißnahtmitte vorhandenen Werkstofftrennungen einen signifikanten Einfluss auf die Gesamtsteifigkeit der Probe unter einer Zugbeanspruchung ausüben. Ein weiteres Merkmal bildet die im Druckbereich der Hysterese vorhandene „Nase“, welche nach KRÜMMLING [1998] ein typisches Anzeichen für die Risssschließung unter einer Druckbeanspruchung ist.

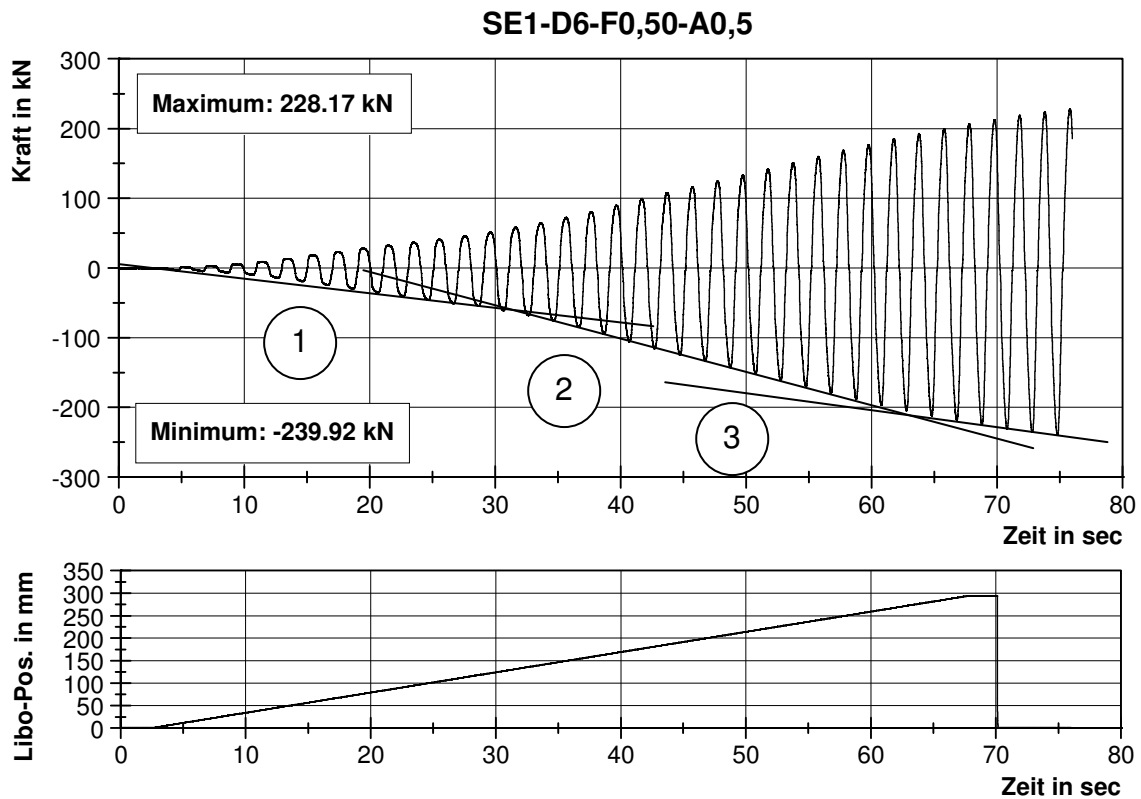


Abb. 3.10 Kraftentwicklung unter einer Amplitude von $\pm 0,5$ mm und einer Frequenz von 0,5 Hz

Hysteresen von SE1-D6-F0,5-A0,5

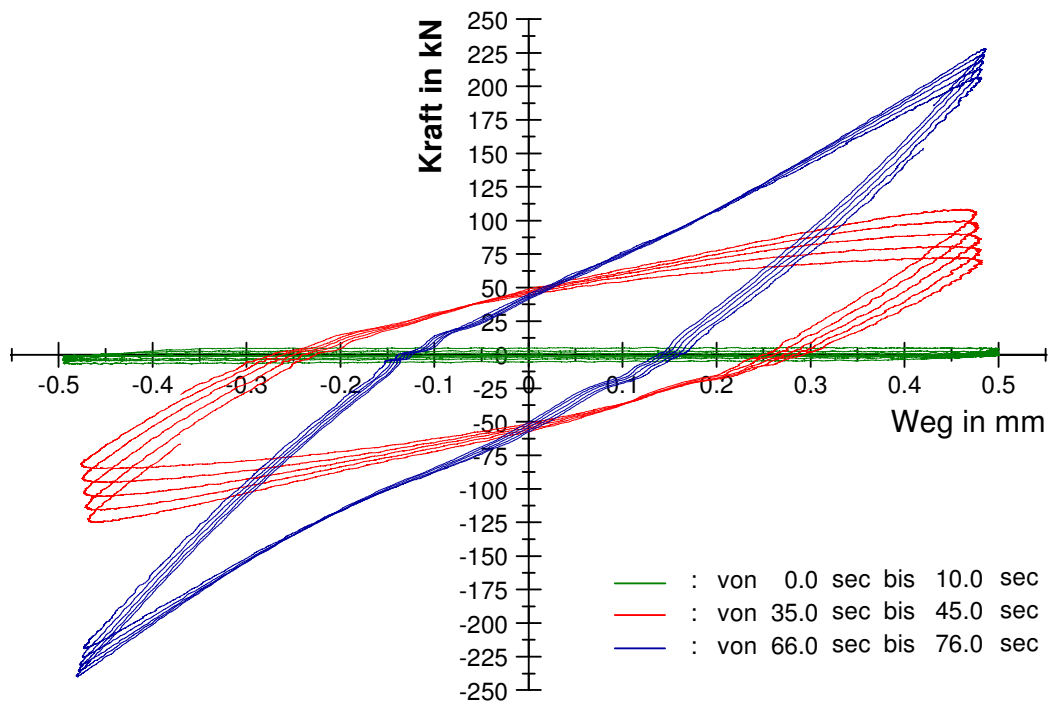


Abb. 3.11 Hysteresenentwicklung bei einer Bewegungsamplitude von $\pm 0,5$ mm und einer Frequenz von 0,5 Hz

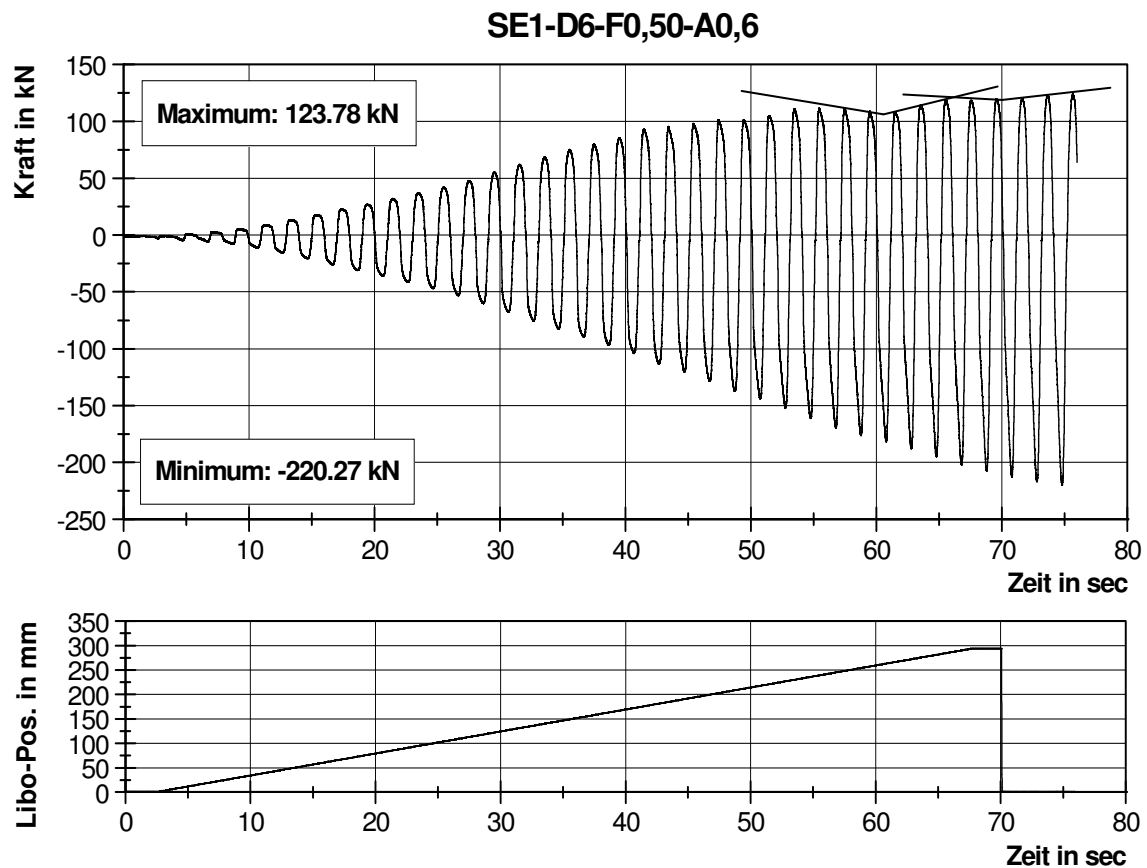


Abb. 3.12 Kraftentwicklung unter einer Amplitude von $\pm 0,6$ mm und einer Frequenz von 0,5 Hz

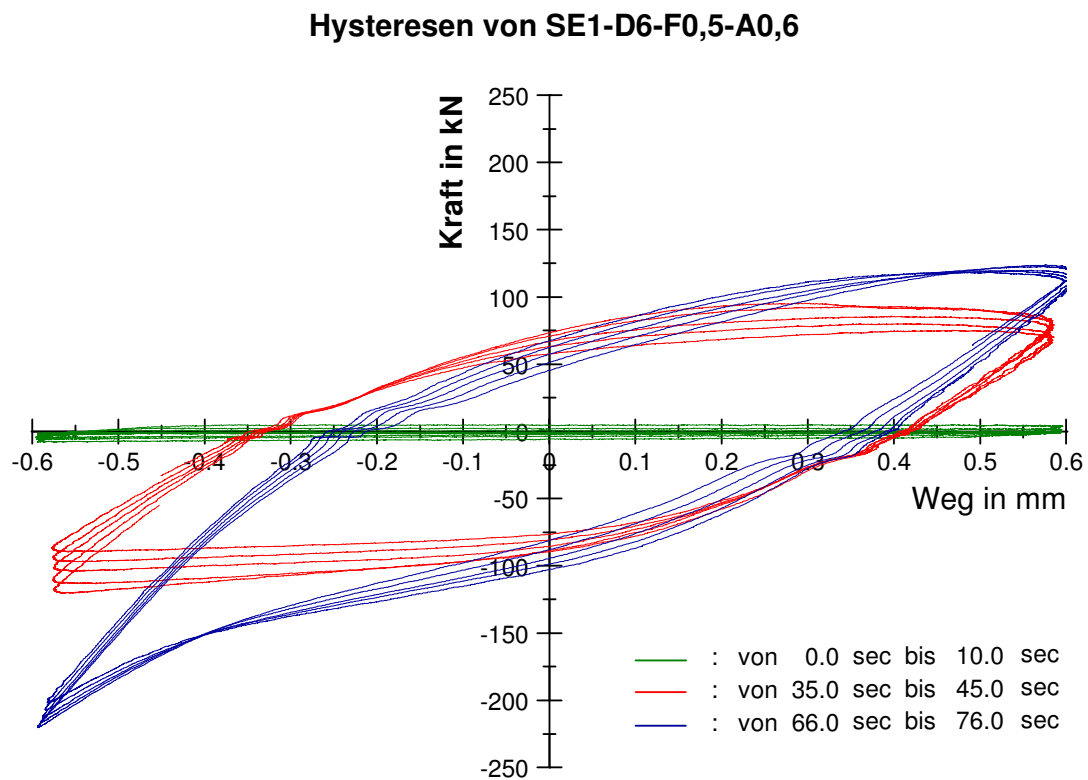


Abb. 3.13 Hysteresenentwicklung bei einer Bewegungsamplitude von $\pm 0,6$ mm und einer Frequenz von 0,5 Hz

Neben der Größe der Bewegungsamplitude beeinflusst die Bewegungsfrequenz die Lage des Kräftemaximums der im Schweißversuch auftretenden maximalen Zug- und Druckkräfte. Die Erhöhung der Bewegungsfrequenz bewirkt eine Verschiebung des Kräftemaximums hin zu kleineren Bewegungsamplituden, vgl. Abb. 3.14. Liegt das Kräftemaximum bei einer Frequenz von 0,5 Hz bei einer Bewegungsamplitude von $\pm 0,5$ mm, so sinkt die zum Erreichen des Maximums aufzubringende Bewegungsamplitude bei einer Verdopplung der Frequenz auf einen Wert von $\pm 0,3$ mm ab. Dieses Verhalten kann dadurch erklärt werden, dass eine steigende Frequenz sich nachhaltig verschlechternd auf die Güte der Schweißnaht auswirken muss. Es ist daher davon auszugehen, dass ein zeitlich erhöhter Wechsel der Zug-/Druckbeanspruchung während des Schweißversuches zu einer Störung des aus der Schweißschmelze erstarrenden Gefüges und damit zu einer früheren Rissbildung führt.

Die Kraftentwicklung während des Schweißversuches, wie auch das Aussehen sowie das Rissverhalten der Schweißnaht, wird durch die Größe der Bewegungsamplitude bzw. Bewegungsfrequenz beeinflusst. In Abb. 3.15 und 3.16 sind Schweißproben unterschiedlicher Frequenz und Bewegungsamplitude gegenübergestellt, welche nach dem Ausbau aus dem Versuchsstand mittels Farbeindringverfahren auf Risse in der Oberfläche untersucht worden sind. Ein Vergleich der Schweißnähte zeigt, dass es mit größer werdender Bewegungsamplitude zu einer verstärkten Ausprägung von Rissen in der Schweißnahtmitte kommt. Beispielhaft ist dieser Sachverhalt aus der Abb. 3.15 ersichtlich. Die unter einer Frequenz von 0,25 Hz hergestellten Schweißnähte weisen bis zu einer Bewegungsamplitude von $\pm 0,3$ mm keinerlei Anrisse in der Nahtmitte auf. Wird

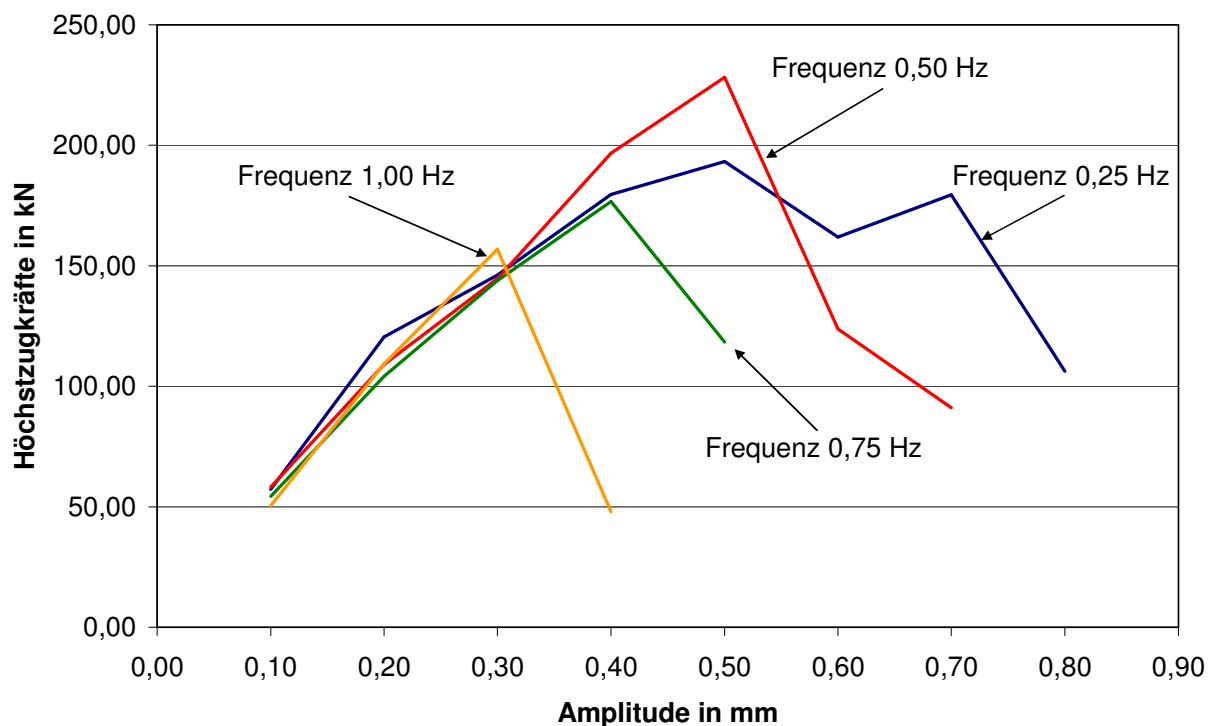


Abb. 3.14 Verlauf der Höchstzugkräfte in Abhängigkeit von der Bewegungsfrequenz zum Zeitpunkt des Schweißendes

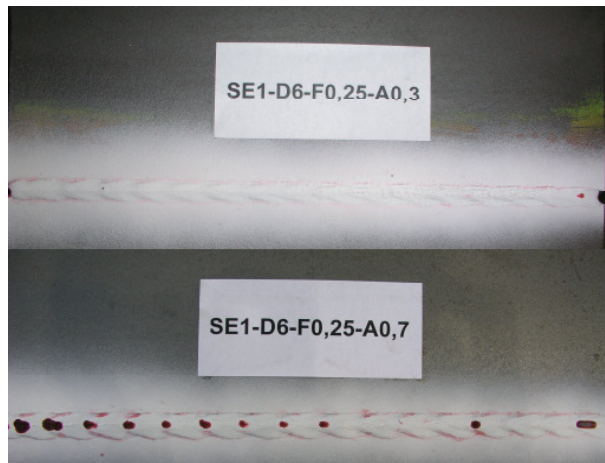


Abb. 3.15 Schweißnahtschuppung bei einer Frequenz von 0,25 Hz und einer Bewegungsamplitude von 0,3 bzw. 0,7 mm

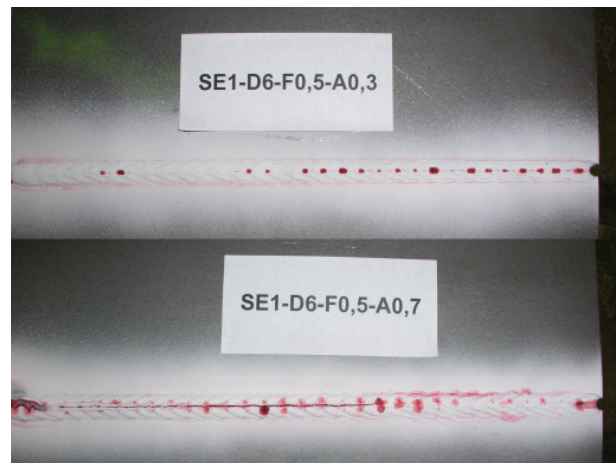


Abb. 3.16 Schweißnahtschuppung bei einer Frequenz von 0,50 Hz und einer Bewegungsamplitude von 0,3 bzw. 0,7 mm

die Bewegungsamplitude gesteigert, treten in Schweißnahtmitte zunächst vereinzelte Anrisse auf, die sich mit zunehmender Amplitude zu regelmäßig angeordneten Rissen ausbilden. Die Anordnung sowie Größe der Risse orientiert sich an der Bewegungsfrequenz und Amplitude. Eine Verdopplung der Bewegungsfrequenz führt zu einer Halbierung des Rissabstandes bei einer gleichzeitigen Zunahme der Rissempfindlichkeit der Schweißnaht. Dieses Verhalten zeigt sich besonders deutlich durch den direkten Vergleich der Schweißnähte in Abb. 3.15 und 3.16, welche unter einer Frequenz von 0,25 Hz bzw. 0,50 Hz hergestellt worden sind. In Abb. 3.15 weist die unter einer Bewegungsamplitude von $\pm 0,3$ mm hergestellte Schweißnaht keinerlei Anrisse in der Nahtoberfläche auf, wohingegen es in Folge einer Frequenzverdopplung, bei ansonsten gleichen Randbedingungen, zu Anrissen in der Schweißnaht kommt, siehe Abb. 3.16. Die Betrachtung der sich darstellenden Versuchsergebnisse für eine Amplitude von $\pm 0,7$ mm bestätigt diesen Sachverhalt. Mit der Vergrößerung der Bewegungsamplitude stellen sich die entstehenden Risse ausgeprägter dar. Wird die Bewegungsfrequenz erhöht, kommt es zu einer vermehrten Rissbildung in der Schweißnahtmitte. Die sich einstellenden Risse beginnen zusammenzuwachsen, so dass es im Grenzfall zu einer vollständigen Probentrennung während der Schweißung kommt. Dieses Verhalten begründet somit die experimentell gefundene Grenzfrequenz von 7 Hz, unter den den Versuchen zugrunde liegenden Randbedingungen.

Neben dem Rissverhalten beeinflussen die Bewegungsamplitude und die Frequenz das Nahtaussehen. Die Vergrößerung der Bewegungsamplitude führt zu einer ausgeprägteren Ausbildung der Schweißnahtschuppung. Eine genauere Betrachtung der Nahtoberfläche lässt erkennen, dass die Nahtschuppenausbildung zusätzlich frequenzgebunden erfolgt. Mit steigender Bewegungsfrequenz wächst die Anzahl der Nahtschuppen pro Längeneinheit, analog sinkt diese mit abnehmender Frequenz. Somit kann postuliert werden, dass eine Korrelation zwischen Bewegungsfrequenz, Amplitude, Nahtschuppung sowie Rissbildung besteht.

3.2.3.2 Zusammenfassung der Versuchergebnisse und Schlussfolgerungen

Wie im vorhergehenden Abschnitt dargestellt, ist ein Verbindungsschweißen unter einachsiger Nahtflankenbewegung innerhalb bestimmter Grenzen möglich. Die zu verschweißenden Bleche wiesen keine anfängliche Verbindung miteinander auf. Sämtliche Schweißversuche wurden über die gesamte Versuchsdauer hinweg in reiner Wegregelung, bei vorgegebener Bewegungsamplitude und Frequenz gefahren. Es konnte gezeigt werden, dass es während des Schweißprozesses zu einer Verbindung der Blechproben und damit zu einer Kraftübertragung kommt. Die Größe der sich während der Schweißversuche einstellenden Kräfte richtet sich nach der aufgetragenen Bewegungsamplitude und Frequenz. Mit zunehmender Bewegungsamplitude kommt es, sowohl auf der Druck- wie auch auf der Zugkraftseite, zu einem Kraftanstieg. Dieser Kraftanstieg erreicht in Abhängigkeit der Bewegungsfrequenz eine maximale Größe, wobei die Lage des Kraftmaximums mit zunehmender Frequenz zu niedrigeren Bewegungsamplituden verschoben wird, vgl. Abb. 3.17 und 3.18. Nach dem Erreichen des Kraftmaximums kommt es zu einem verstärkten Kraftabfall, welcher als kennzeichnend für die technisch sinnvolle Anwendungsgrenze aufgefasst werden kann. Bemerkenswert ist, dass der Kraftverlauf der Höchstkräfte zunächst keine Abhängigkeiten von der Bewegungsfrequenz aufweist. Wie aus Abb. 3.14 ersichtlich, verläuft die Kraftentwicklung der Höchstzugkräfte bis zum Erreichen des jeweiligen Kraftmaximums identisch. Diese Eigenschaft konnte bis zu einer Frequenz von 1,00 Hz beobachtet werden.

Die sich während der Schweißversuche ergebenden Kraftentwicklungsverläufe weisen eine Verschiebung der Kraftamplituden in den Druckbereich auf, was sich durch die Ausdehnung der Versuchskörper infolge der thermischen Beanspruchung erklärt. Daraus resultiert ein abflachender Verlauf der Zugkraftentwicklung, der sich durch die sich darstellende Steifigkeitsreduktion infolge Rissbildung verstärkt. Grundsätzlich weisen sämtliche Versuchskörper reiðverschlußartige Risse in der Schweißnahtmitte auf. Rissgröße und Abstand korrelieren mit der Bewegungsfrequenz bzw. Amplitude. Mit zunehmender Frequenz kommt es zu einem Zusammenwachsen der Teilrisse, bis eine durchgehende Bauteiltrennung in Nahtmitte vorliegt. Als Grenze konnte unter den zugrunde liegenden Versuchrandbedingungen eine Bewegungsfrequenz von 7,0 Hz bestimmt werden.

Eine Aussage über die mögliche Beanspruchbarkeit der unter Bewegung hergestellten Schweißverbindungen ist anhand der aufgezeichneten Versuchsdaten noch nicht möglich. Grundsätzlich kann jedoch anhand der Versuche gezeigt werden, dass eine Verbindung von Bauteilen unter Bewegung mittels Schweißung und damit eine Kraftübertragung möglich ist. Des Weiteren zeigen die durchgeführten Schweißversuche die Grenzparameter auf, innerhalb derer eine technisch sinnvolle Schweißung überhaupt möglich erscheint.

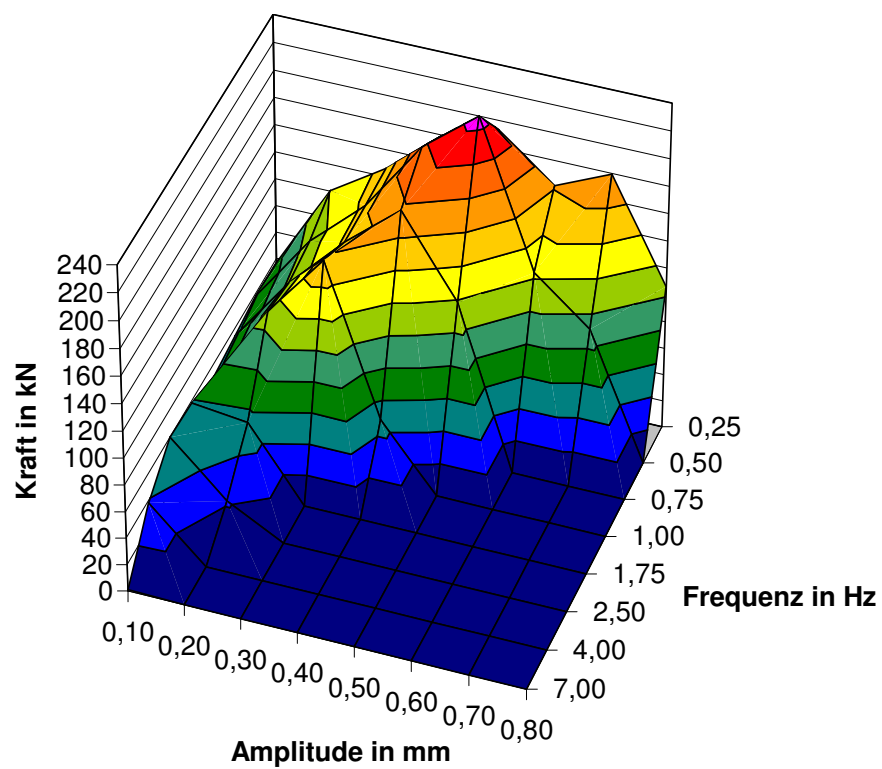


Abb. 3.17 Höchstzugkräfte während des Schweißprozesses nach ca. 75 Sekunden

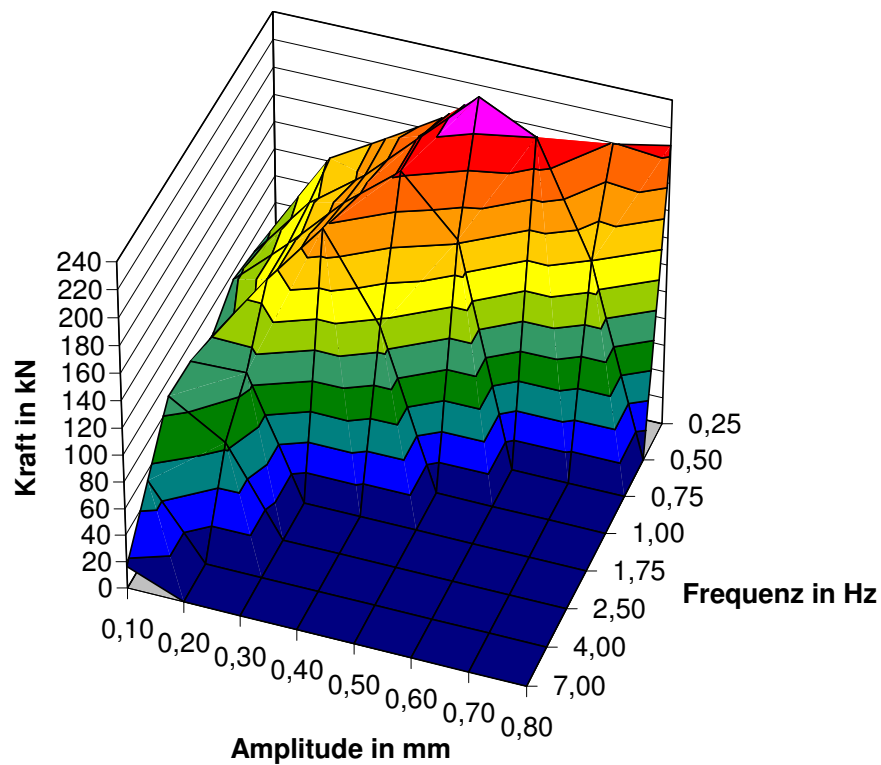


Abb. 3.18 Höchstdruckkräfte während des Schweißprozesses nach ca. 75 Sekunden

3.3 Schweißversuche mit Eigenbadsicherung

3.3.1 Versuchsbeschreibung

3.3.1.1 Werkstoffe und Probengeometrie

Für die durchgeführten Schweißversuche wurde als Probenwerkstoff ein Baustahl S355 J2G3 gemäß den Anforderungen der DIN EN 10025 ausgewählt. Hinsichtlich der Auswahl der Werkstoffgüte gelten die im Kapitel 3.2.1.1 vorgestellten Überlegungen. Das verwendete Blechmaterial stammt aus einer Stahlcharge und weist die in Tabelle 3.3 angegebene chemische Zusammensetzung auf.

Die im Rahmen der Schweißversuche verwendeten Blechproben weisen die in Abb. 3.19 dargestellte Geometrie auf. Analog zu den in Kapitel 3.2.1.1 gemachten Ausführungen wurden erhöhte Anforderungen an die Maßhaltigkeit der Versuchskörper gestellt, um eine schlupffreie Verbindung der Probenbleche mit den Lagerschlitzen des Versuchsrahmens zu garantieren. Zur Simulation des ausgefugten Bauteilanrisses wurden die 10 mm starken Blechproben mit einer V-förmigen Nut versehen, welche mittels CNC-Fräsung in den Probekörper eingebracht wurde. Die Nut besitzt einen Öffnungswinkel von 60° und reicht 6 mm tief in das Probenblech. Der sich daraus ergebende Restquerschnitt besitzt eine Stärke von 4 mm und dient als Schmelzbadsicherung. Im Bereich der späteren Schweißnahtwurzel weist die Nut eine Breite von 1,00 mm auf. Rückstände aus Kühl- und Schneidmitteln wurden vor dem Probeneinbau durch gründliches Reinigen und Entfetten der Probe entfernt.

Tab. 3.3 Chemische Zusammensetzung des Probenmaterials S355 J2G3 in % für eine Blechstärke von $t=10$ mm

C	Si	Mn	P	S	N	Al	Cu	Cr
0,149	0,302	1,547	0,014	0,014	0,0041	0,038	0,038	0,043
Ni	Mo	As	Sn	Ti	V	Nb	Ca	B
0,037	0,003	0,004	0,004	0,003	0,003	0,002	0,0008	0,0001

3.3.1.2 Schweißverfahren und -parameter

Für das Abschweißen der Versuchskörper wurde das in Kapitel 3.2.1.2 beschriebene, mittels Schweißroboter, vollautomatisierte MAG-Schweißverfahren angewendet. Als Schweißstromquelle kam die bereits während der ersten Versuchserie verwendete Inverterschweißstromquelle vom Typ Trans Synergic 5000 Comfort® der Firma Fronius zum Einsatz. Bei dem eingesetzten Schweißzusatzwerkstoff handelte es sich um eine Schweißdrahtelektrode vom Typ DIN EN 440 - G 50 3 M G4Si1 (Markenname Oerlikon CARBOFIL 1A®), welche unter Mischgas M21 (18% CO², 82% Argon) verschweißt wur-

Sämtliche Versuchsschweißungen wurden in einer neutralen Brennerstellung durchgeführt, d.h. der Schweißbrenner besaß eine zur Blechoberfläche senkrecht ausgerichtete Orientierung. Der Brennerabstand zur Blechoberfläche betrug 12 mm.

3.3.1.3 Parameterfeld der Bewegungsamplitude und Frequenz

Wie im Kapitel 3.1 erläutert, dient das Verschweißen von Rissen in einer bestehenden Konstruktion in erster Linie dem Stoppen des Risswachstums und somit der Abwehr einer weitergehenden Schädigung des Bauteils. Im Gegensatz zu Konstruktionselementen, die vor dem Beginn der Schweißung komplett voneinander getrennt sind, weisen die durch einen Anriss geschädigten Bauteile einen tragenden Restquerschnitt auf. Die Sanierung eines derart geschädigten Bauteils sieht in der Regel ein Ausfügen des Risses bis auf den Rissgrund sowie ein anschließendes Verschweißen vor. Das beschriebene Verfahren setzt eine sorgfältige Ausführung voraus, da es anderenfalls durch im Bauteilquerschnitt verbleibende Anrisse zu einer wiederholten Rissausbreitung kommen kann. Ursächlich für die erneute Rissausbreitung sind somit die bei mangelhafter Sanierung im Bauteil verbleibenden Kerben, die den Ausgangspunkt für eine erneute Rissbildung darstellen.

Durch das Ausfügen des Anrisses wird das Bauteil für die Schweißung vorbereitet. In der Regel wird eine V-förmige Nahtvorbereitung gewählt, die geometrisch so bemessen ist, dass die Wurzel durch den Schweißer sicher erfasst wird. Unterliegt das Bauteil während der Schweißung einer dynamischen Beanspruchung, kommt es zwangsläufig zu einer Bewegung der Schweißnahtflanken. Infolge der eingepprägten Bewegung erfährt der Wurzelgrund, als schwächste Stelle im Bauteil, die größte Dehnungsbeanspruchung. Inwieweit sich die Dehnung des Wurzelgrundes als auch die Bewegung der Nahtflanken auf die sich einstellende Nahtqualität auswirkt wurde bisher nicht untersucht. Aufgrund der damit fehlenden Kenntnisse hinsichtlich der maximalen Beanspruchbarkeiten während des Schweißprozesses, wurde ein Versuchsplan festgelegt, der zur Eingrenzung einer später folgenden detaillierten Untersuchung dienen soll.

Die Festlegung des Parameterfeldes aus Bewegungsamplitude und Frequenz, orientiert sich an den gesammelten Erkenntnissen des Verschweißens von Blechproben

Tab. 3.4 Parameterfeld der Schweißversuche,
Anzahl der Versuche je Parametersatz

		Frequenz in Hz		
		0,25	1,00	2,00
Amplitude in mm	$\pm 1,10$	1	-	-
	$\pm 0,80$	3	-	-
	$\pm 0,50$	2	2	-
	$\pm 0,20$	3	3	3

unter einer senkrecht zur Schweißnaht aufgebrachten Bewegung, bei zunächst vollständiger Bauteiltrennung, vgl. Abb. 3.1. Berücksichtigung bei der Festlegung des Parameterfeldes fand die Überlegung, dass das Schweißschmelzbad gegen Durchfallen infolge des vorhandenen Restquerschnittes gesichert ist, so dass eine Überbrückung größerer Bewegungsamplituden möglich ist. Anhand der vorstehenden Überlegungen erfolgte die Festlegung des in Tab. 3.4 dargestellten Parameterfeldes. Zur Erfassung möglicher Streuungen wurden die Schweißversuche unter gleichen Rahmenparametern mehrfach, d.h. in der Regel 3fach, durchgeführt. Die Anzahl der jeweils durchgeführten Versuche ist der Tab. 3.4 zu entnehmen. Es ist anzumerken, dass die für die Bewegungsamplituden von $\pm 0,5$ mm und $\pm 1,10$ mm abweichende Anzahl der durchgeführten Schweißversuche in einem Mangel an chargengleichen Probenmaterial begründet ist. Dieser Mangel resultiert aus der Verwendung des Probenmaterials zur Auffindung der temperaturabhängigen Werkstoffkennwerte, vgl. Kapitel 3.3.1.1. und Kapitel 6. Insgesamt wurden 8 verschiedene Parameterkombinationen bei den durchgeführten Schweißversuchen berücksichtigt, so dass sich die Gesamtzahl der Schweißversuche zu 17 ergab. Das Spektrum der untersuchten Bewegungsamplituden erstreckt sich über einen Bereich von $\pm 0,20$ mm bis $\pm 1,10$ mm. Die untersuchten Frequenzen lagen in einem Bereich von 0,25 Hz bis 2,00 Hz.

3.3.2 Referenzschweißung ohne Nahtflankenbewegung

Zur Beurteilung der Auswirkung einer Nahtflankenbewegung während des Schweißprozesses auf die Schweißnahtgüte ist es unerlässlich, die Ergebnisse der durchgeführten Schweißversuche unter Bewegung mit denen einer Schweißung in Ruhe zu vergleichen. Analog zu dem im Kapitel 3.2 beschriebenen Vorgehen wurden drei Referenzschweißungen in Ruhe durchgeführt und untersucht. Die verwendete Probenform sowie die Rahmenparameter für die Durchführung der Schweißung entsprachen denen der unter Bewegung hergestellten Schweißproben. Der in den Versuchstand eingebaute Probekörper wurde über die Dauer des Schweißversuches in seiner Position gehalten, d. h. fixiert, so dass eine Messung der, infolge thermischer Dehnung, auftretenden Zwängungskräfte möglich war. Vor der Versuchsdurchführung wurde die Anlage auf Nullkraft eingeregelt, was einen kraft- und damit spannungsfreien Zustand des Probekörpers zu Versuchbeginn garantiert.

Abb. 3.20 zeigt exemplarisch die Kraftentwicklung während des Schweißversuches. Der gemessene Kraftverlauf weist zu Beginn der Schweißung einen moderaten Anstieg der Druckkraft auf. Die durch den Schweißprozess in das Probenblech eingetragene Wärmeenergie fließt in die kälteren Blechbereiche ab. Hinter dem vorlaufenden Lichtbogen bildet sich eine keilförmige Wärmefront aus, vergleichbar mit der Heckwelle eines Schiffes. Die dem Lichtbogen nachlaufende Wärmefront bewirkt zunächst eine langsame Erwärmung der Schweißprobe, wodurch es zu einem gemäßigten Anstieg der Druckkraft infolge thermischer Ausdehnung kommt. Ein Abbau der Druckkraft bis in den Zugbereich, wie für das Verschweißen von Blechproben bei zunächst vollständiger Trennung in Abb. 3.4 darstellt, tritt nicht auf. Dieses Verhalten liegt darin begründet,

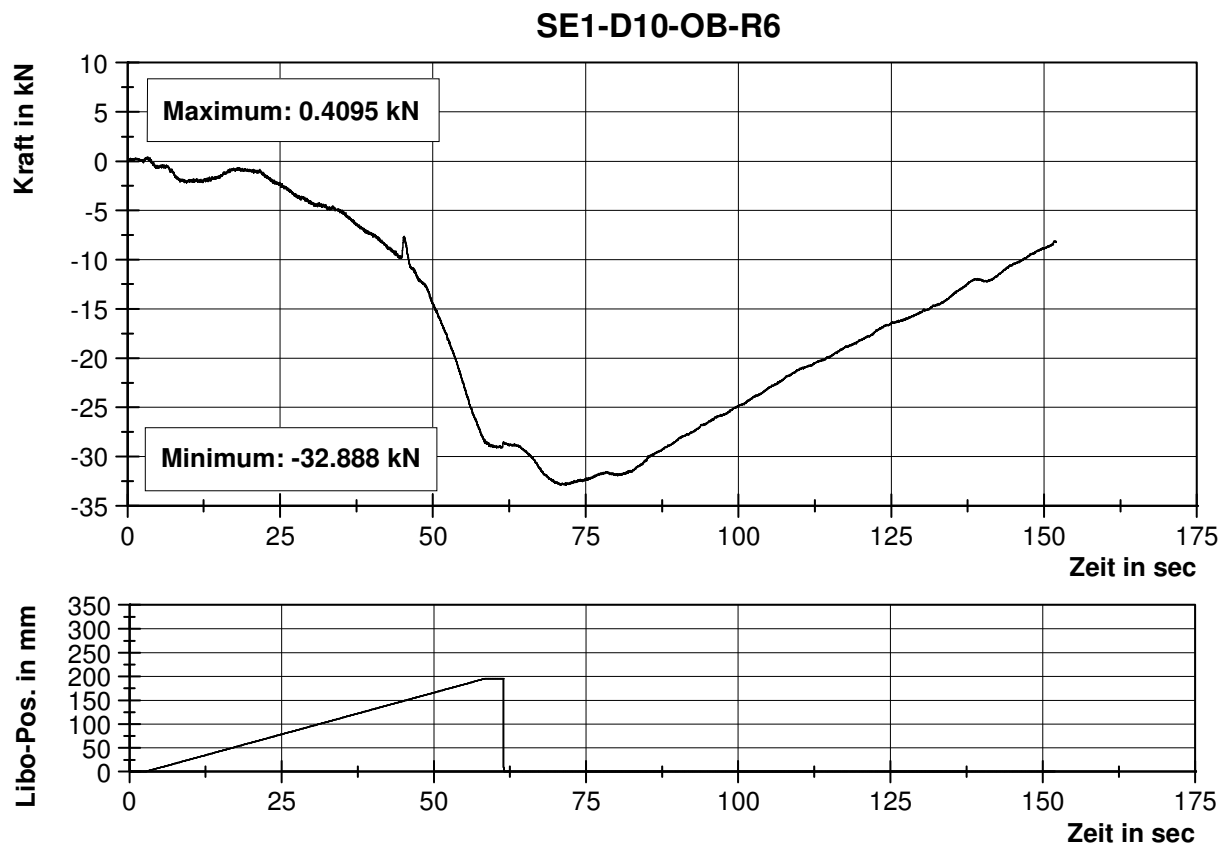


Abb. 3.20 Kraftentwicklung während des Schweißversuchs einer in Ruhe geschweißten Probe mit Eigenbadsicherung

dass der vorhandene Restquerschnitt des Versuchsbleches unterhalb der Nahtwurzel durch den Schweißprozess nicht vollständig aufgeschmolzen wird bzw. das Versuchsblech im Bereich der Schweißnaht keine vollständige Trennung aufweist. Die durch die Abkühlung der Schweißnaht entstehenden Zugkräfte schließen sich über den kühleren Restquerschnitt der Probe kurz. Gleichzeitig fließt die durch den Schweißprozess eingeleitete Wärmeenergie in die kühleren Bereiche des Versuchskörpers, wodurch es zu einer weiteren thermischen Ausdehnung der Probe kommt. Die sich infolge der Ausdehnung darstellenden Druckkräfte, bewirken ein Überdrücken der vorhandenen Zugkraftanteile, was zu einer Steigerung der Druckkraft führt. Mit fortschreitender Schweißung kommt es zu einem überproportionalen Anstieg der Druckkraft. Der Steigungsgradient der Druckkraftentwicklung erreicht zum Ende der Schweißung ein Maximum. Nach dem Erlöschen des Lichtbogens nimmt die Steigerung der Druckkraft infolge der nachlaufenden Wärmeausbreitung sowie dem fehlenden Energieeintrag ab. 13 Sekunden nach der Beendigung des Schweißprozesses ist das Maximum der Druckkraftentwicklung erreicht. Die anschließende Phase der Probenabkühlung führt zu einem Schrumpfen des Versuchskörpers und dem damit verbundenen Abbau der Druckkraft. Infolge des gleichmäßigen Wärmeabflusses kommt es zu einem kontinuierlichen Abbau der vorhandenen Druckkraft, was sich in dem linearen Kraftverlauf widerspiegelt.

3.3.3 Auswertung der Schweißversuche und Zusammenfassung

3.3.3.1 Auswertung der Schweißversuche mit Eigenbadsicherung

Das Aufbringen der Bewegungsbeanspruchung auf den Versuchskörper erfolgte durch die hydraulische Ansteuerung der Lagerschlitten. Bewegungsamplitude und Frequenz entsprachen den im Regelungsprogramm hinterlegten Parameterdaten. Sämtliche Schweißversuche wurden in reiner Wegregelung gefahren. Abb. 3.21 zeigt beispielhaft die gemessenen Bewegungsverläufe der Wirbelstrom-Wegmesssensoren rechts und links des Probenbleches. Deutlich ist der sinusförmige Bewegungsablauf für eine Amplitude von $\pm 0,50$ mm unter einer Frequenz von 0,25 Hz zu erkennen. Die gemessenen Wegamplituden weisen keine signifikanten Über- und/oder Unterschreitungen der geforderten Bewegungsamplitude auf. Abweichungen zwischen den Messwerten der einzelnen Sensoren sind nicht erkennbar, so dass eine Verdrehung der Lagerung auszuschließen ist. Analog kann, nach Auswertung aller Versuchsdaten, diese Aussage für sämtliche durchgeführten Schweißversuche getroffen werden. Ein Vergleich der in Abb. 3.5 und Abb. 3.21 dargestellten Wegverläufe zeigt, dass die Qualität der aufgebrachten Bewegungen, hinsichtlich einer vorhandenen Lagerverdrehung, größer ist, wenn der Versuchskörper eine Verbindung (Restquerschnitt) im Schweißnahtbereich aufweist. Die Ursache für dieses günstigere Verhalten ist die geringere Lastexzentrizität während

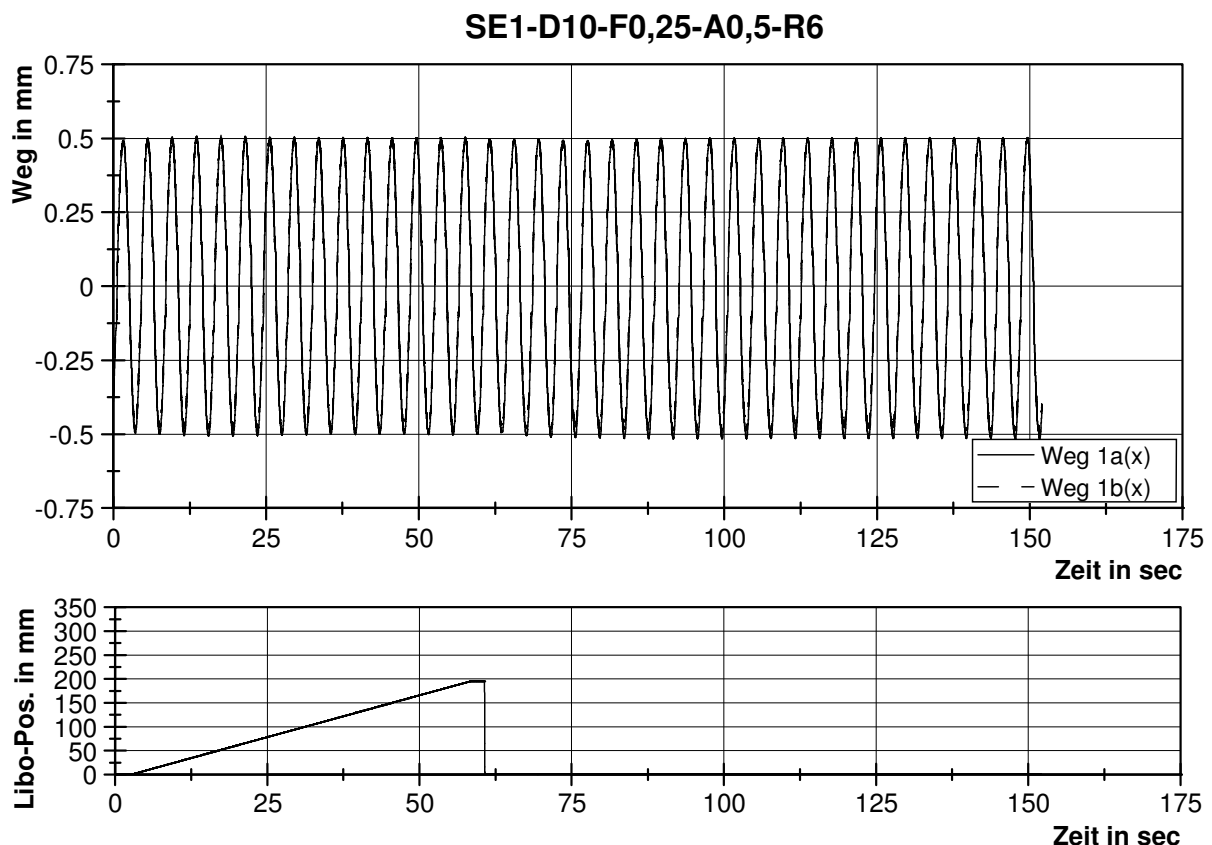


Abb. 3.21 Verlauf der Bewegungsamplituden über die Versuchsdauer gemessen an den Seiten des Probenblechs

des Schweißversuches. Neben der Lagerschlittenorientierung beeinflusst die vorhandene Restquerschnittsfläche die Größe der tatsächlichen Nahtflankenbewegung. Infolge des durch den Lagerschlitten aufgebrachten Weges kommt es zu einer gesamten Dehnung des Probenbleches zwischen den Auflagerpunkten. Diese Gesamtdehnung setzt sich zunächst aus den Dehnungsanteilen des 10 mm starken Probenbleches zwischen den Lagerpunkten, den Dehnungsanteilen des 4 mm starken Kerbgrundes und der Schweißnahtvorbereitung sowie den Anteilen aus der Probeneinspannung zusammen. Inwieweit sich diese Verkettung an unterschiedlichsten Steifigkeiten auf die tatsächliche Bewegung der Nahtflanke auswirkt, kann zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht umfassend beantwortet werden. Dies liegt im Wesentlichen in der mangelnden Kenntnis der Steifigkeit der Probeneinspannung sowie in der transient und örtlich veränderlichen Steifigkeit der Probe selbst begründet. Mit zunehmender Erwärmung des Probenbleches kommt es zu einer Absenkung des E-Moduls, welcher temperaturabhängig über die Probenfläche variiert. Beide Faktoren machen eine Prognose unsicher, wenn nicht gar unmöglich. Eine numerische Simulation mittels der FE-Methode kann hierzu einen Lösungsansatz bieten, jedoch bleibt die Unsicherheit der korrekten Berücksichtigung der Steifigkeit der Probeneinspannung. Es scheint daher geboten, die Nahtflankenbewegung direkt zu messen, was jedoch aufgrund der extremen Umweltbedingungen während des Schweißprozesses als schwierig erscheint. Hinsichtlich der Deutung der Versuchsergebnisse bleibt festzustellen, dass die extreme Erwärmung im direkten Schweißnahtbereich ein Absenken des E-Moduls und somit der Steifigkeit zur Folge hat. Es lässt sich daher schlussfolgern, dass die vorhandenen Dehnungen sich innerhalb dieses Bereiches konzentrieren.

Das Abschweißen der Probenbleche erfolgte mittels des im Kapitel 3.3.1.2 beschriebenen vollautomatisierten MAG-Schweißverfahrens im Impulslichtbogen. Die während der Schweißversuche aufgenommenen Strom- und Spannungsverläufe weisen eine analoge Charakteristik zu den in Abb. 3.6 beispielhaft dargestellten Verläufen auf. Strom, Spannung und Tropfenablösefrequenz entsprachen den am Schweißgerät voreingestellten Werten. Fehler in der Schweißprozesssteuerung waren nach der Messdatenauswertung für sämtliche Schweißversuche nicht erkennbar, so dass von einer zuverlässigen Einhaltung der Schweißprozessparameter auszugehen ist.

Wie bereits angedeutet, unterliegt das Steifigkeitsverhalten des Probekörpers während des Versuches einer stetigen Veränderung, welche sowohl werkstofflicher als auch geometrischer Natur ist. Mit fortschreitendem Schweißprozess und damit der Einbringung der Schweißnaht, kommt es zu einer lokalen Änderung der Bauteilgeometrie, d. h. die Querschnittsfläche im Bereich der Schweißung vergrößert sich, die geometrische Steifigkeit nimmt zu. Gleichzeitig findet eine Erwärmung der Schweißprobe statt. Infolge des transienten Wärmefeldes ändern sich die physikalischen und mechanischen Werkstoffeigenschaften im Bauteil und damit das Steifigkeitsverhalten des Probenbleches. Die Erwärmung des Versuchskörpers verursacht eine Steifigkeitsabnahme, hervorgerufen durch die Absenkung des E-Moduls. Aufgrund der Abhängigkeit vom Schweißfortschritt weisen sowohl die geometrische als auch werkstoffliche Steifigkeitsveränderung einen instationären Charakter auf. Beide Prozesse laufen zeitgleich ab

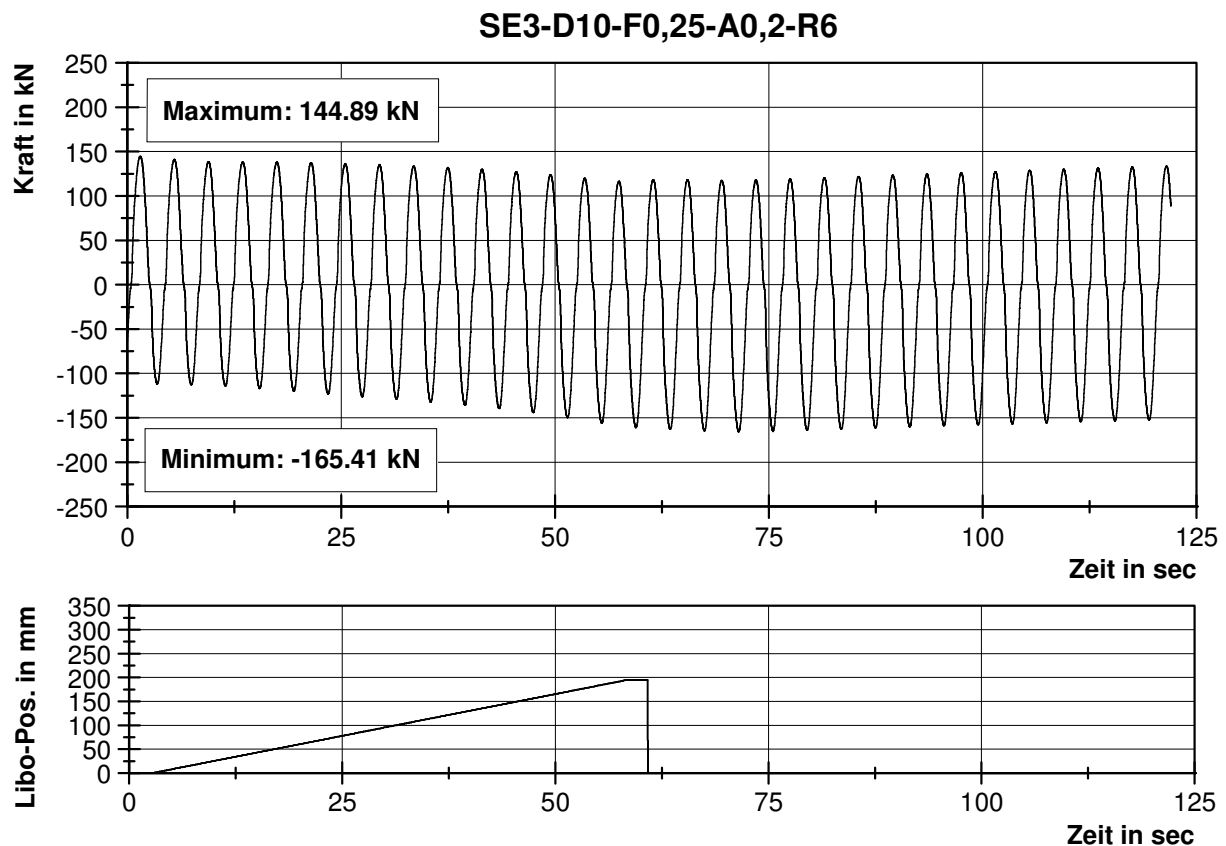


Abb. 3.22 Kraftentwicklung unter einer Amplitude von $\pm 0,2$ mm und einer Frequenz von 0,25 Hz

und beeinflussen somit das Gesamtverhalten der Probe und damit die Kraftentwicklung in der Schweißprobe. Abb. 3.22 zeigt exemplarisch die Kraftentwicklung während des Schweißversuches unter einer Bewegungsamplitude von $\pm 0,2$ mm, bei einer Frequenz von 0,25 Hz. Auffälliger scheint der zunächst parallele Verlauf der Amplitudenspitzen von Druck- und Zugkraft. Anders als bei dem Verschweißen zweier zunächst vollständig getrennten Probenbleche, ist der Amplitudenausschlag der Kraft in seiner Betragsgröße nahezu konstant. Ein kontinuierlicher Kraftanstieg, vergleichbar mit dem in Abb. 3.7, ist nicht erkennbar. Dies scheint zunächst widersinnig, da es mit fortschreitendem Schweißprozess zu einer Querschnittsvergrößerung und damit zur Erhöhung der geometrischen Steifigkeit infolge der eingebrachten Schweißnaht kommt. Erklärt werden kann dieses Verhalten, betrachtet man die Möglichkeit der Kraftübertragung durch den Probenrestquerschnitt. Zu Beginn der Schweißung liegt, im Vergleich zu den im Kapitel 3.2 beschriebenen Versuchen, eine Verbindung im Bereich der Schweißnaht vor. Ein Aufbringen der Wegbeanspruchung führt zu einer Probendehnung und der damit verbundenen Entstehung von Kräften. Diese können über den noch „kalten“ Restquerschnitt übertragen werden. Die Festigkeit bzw. die Steifigkeit der Probe ist zunächst noch nicht beeinträchtigt. Mit dem Beginn der Schweißung bzw. infolge des fortschreitenden Schweißprozesses erwärmt sich der Versuchskörper. Insbesondere die bereits abgeschweißten Nahtbereiche inklusive des Restquerschnittes weisen Temperaturen auf, die zu einer signifikanten Erniedrigung des E-Moduls und damit der werkstofflichen

Hysteresen von SE3-D10-F0,25-A0,2-R6

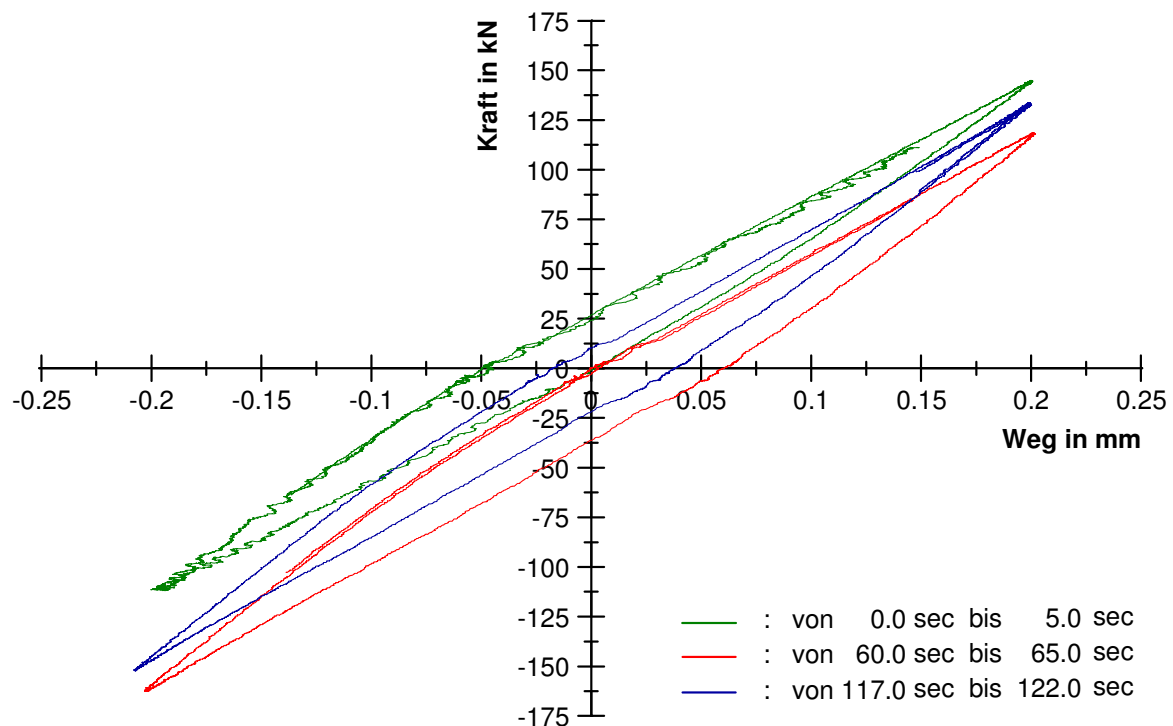


Abb. 3.23 Hysteresenentwicklung bei einer Bewegungsamplitude von $\pm 0,2$ mm und einer Frequenz von 0,25 Hz

Steifigkeit sowie Festigkeit der abgeschweißten Probenbereiche führen. Die Verringerung der werkstofflichen Steifigkeit infolge der Temperaturbeanspruchung aus dem Schweißprozess erfolgt entgegengerichtet der Erhöhung der geometrischen Probensteifigkeit durch die eingebrachte Schweißnaht. Liegt ein Gleichgewicht vor, so kommt es zu einem parallelen Kräfteverlauf zwischen Zug- und Druckkraft. Ein Ansteigen des Betrages von Zug- und Druckkraft findet somit nicht statt. Dieser Sachverhalt wird auch durch die in Abb. 3.23 dargestellten Hysteresenverläufe widerspiegelt. Zur besseren Übersicht wurden jeweils 5 Sekunden der Kraft-Weg-Beziehung am Versuchsanfang, zum Schweißprozessende sowie am Versuchsende dargestellt. Alle Hysteresen weisen bei gleicher Bewegungsamplitude die annähernd gleiche Steigung und somit dasselbe Steifigkeitsverhalten auf.

Analog zu den Kraftverläufen des Kapitels 3.2 zeigt eine genauere Betrachtung der Kraftentwicklung über die Versuchsdauer, dass es parallel zum Schweißfortschritt zu einer Verschiebung der Kraftamplituden in den Druckbereich kommt, vgl. Abb. 3.22. Wie die in der Abb. 3.23 dargestellten Hysteresenverläufe erkennen lassen, beträgt die Kräfteverschiebung der Amplitudenausschläge zum Zeitpunkt des Schweißendes rd. 25 kN. Dieser Wert entspricht genau der Druckkraft, welche sich im Prüfkörper zum Schweißende einer Schweißung in Ruhe, d. h. ohne Nahtflankenbewegung einstellt, vgl. Abb. 3.20. Die sich darstellende Verschiebung der Kraftamplituden muss somit aus der behinderten Ausdehnung des Probekörpers infolge thermischer Beanspruchung

herrühren. Das Maximum der Druckkraftverschiebung liegt bei sämtlichen durchgeführten Versuchen bei rd. 11 bis 13 Sekunden nach der Beendigung des Schweißprozesses, vgl. Abb. 3.22. Der zeitliche Versatz des Kraftmaximums zum Schweißende resultiert aus dem zeitlichen Nachlauf der Wärmefront zum erloschenen Schweißlichtbogen. Mit dem Erlöschen des Lichtbogens erfolgt keine weitere Zufuhr von Wärmeenergie in das Probenblech, was die thermische Ausdehnung verlangsamt und schließlich zum Stillstand bringt. Auch dieser Sachverhalt kann durch die Betrachtung der Abb. 3.20 bestätigt werden, womit eine Korrelation zwischen den Kraftverläufen der Schweißung in Ruhe bzw. Bewegung gegeben ist.

Nach dem Durchschreiten des Druckkraftmaximums beginnt die Schweißprobe sich abzukühlen und zusammenzuziehen. Die in der Probe vorhandenen Druckkraftanteile aus thermischer Dehnung bilden sich annähernd linear zurück. Gleichzeitig erhöht sich die werkstoffliche Steifigkeit der Schweißprobe. Mit sinkender Bauteiltemperatur kommt es zu einer Erhöhung des E-Moduls und damit der Probensteifigkeit, was zu einer anfänglich nur leichten Vergrößerung der Kraftamplituden führt. Die sich darstellenden Zug- und Druckkraftverläufe weisen eine zunehmende Divergenz auf, wobei der Anstieg der Druckkraft, aufgrund der vorhandenen, jedoch rückläufigen thermischen Dehnungen, zunächst geringer ausfällt.

Es ist an dieser Stelle anzumerken, dass die anfängliche Parallelität der Kräfte sowie die sehr geringe Divergenz im späteren Kräfteverlauf, in Größe und Ausprägung, u. a. mit in der Wahl der Probengeometrie begründet liegen. Bezogen auf die Gesamtquerschnittsfläche, würde eine prozentual abnehmende Restquerschnittsfläche zu einer Angleichung zwischen den Ergebnissen der Schweißungen mit und ohne Eigenbadsicherung führen, da eine Minimierung der Restquerschnittsfläche eine größere Wichtung der Steifigkeitsänderung durch den Schweißprozess selbst bedingt. Eine ähnliche Überlegung ergibt sich für den Fall einer größeren Probenbreite und damit Schweißnahtlänge. So gewinnt der Steifigkeitsunterschied zwischen Nahtanfang und Nahtende, infolge des auftretenden Temperaturunterschiedes, bei einer zunehmenden Schweißnahtlänge an Bedeutung. Im Gegensatz zu dieser Überlegung, stellt sich bei den hier untersuchten Schweißproben ein Temperatúrausgleich innerhalb des Bauteils bereits nach relativ kurzer Zeitspanne ein.

Die während des Schweißprozesses auftretenden Kräfte sowie deren Entwicklung werden signifikant durch die aufgebrachte Bewegungsamplitude beeinflusst, siehe auch Kapitel 3.2.3.1. Ein Vergleich zwischen den Schweißversuchen gleicher Frequenz aber unterschiedlicher Amplitude lässt erkennen, dass eine Vergrößerung der Bewegungsamplitude zu einem kontinuierlichen Anstieg der auftretenden maximalen Zug- und Druckkräfte führt. Abb. 3.24 zeigt exemplarisch den Entwicklungsverlauf der sich während der Schweißversuche für eine Bewegungsfrequenz von 0,25 Hz darstellenden Höchstzug- und Druckkräfte. Durch die Vergrößerung der Bewegungsamplitude kommt es, infolge der damit verbundenen Dehnungsbeanspruchung des Versuchskörpers, zu einem Anwachsen der auftretenden Kraftmaxima. Ein direkter Vergleich der Hysteresenverläufe unter einer Bewegungsamplitude von $\pm 0,50$ mm (Abb. 3.26) bzw. $\pm 0,2$ mm (Abb. 3.23) lässt die mit steigender Amplitude zunehmende plastische Ausprägung der

Hysteresenform erkennen. Im Gegensatz zu den Forschungsergebnissen der Schweißversuche mit anfänglicher Probestrennung unterscheiden sich die gemessenen Zug- und Druckkraftmaxima mit zunehmender Bewegungsamplitude in ihrer Größe und Lage. Wie aus der Abb. 3.25 zu erkennen, treten die Höchstdruckkräfte rd. 10 bis 13 Sekunden nach dem Erlöschen des Schweißlichtbogens auf, wohingegen das Zugkraftmaximum zum Ende der Messung nach rd. 150 Sekunden erreicht wird. Analog zu den Versuchsergebnissen des Kapitels 3.2.5 streben die Höchstkraftverläufe der Abb. 3.24 einem Maximum entgegen, welches die Grenze der technisch sinnvollen Schweißung markiert. Mit dem Erreichen des Kraftmaximums kommt es zu einem verstärkten Abfall der beim Schweißversuch gemessenen Maximalkräfte. Dies gilt insbesondere mit Blick auf den Verlauf der maximalen Höchstzugkräfte. Eine genauere Betrachtung der Schweißproben bzw. aufgenommenen Versuchsdaten zeigt, dass es analog zu den in Kapitel 3.2 beschriebenen Versuchsergebnissen mit steigender Bewegungsamplitude zu einer Rissbildung in der Schweißnahtmitte kommt. Infolge der auftretenden und mit größer werdender Bewegungsamplitude anwachsenden Risse steht für die Zugkraftübertragung ein immer kleinerer werdender Querschnittsbereich zur Verfügung. Nach dem Durchschreiten des Kraftmaximums im Höchstkraftverlauf der Abb. 3.24 kommt es zu einer Verbindung der vorhandenen Risse, bis diese die Schweißprobe auf der gesamten Nahtlänge durchtrennen. Eine Übertragung von Zugkräften ist nicht mehr möglich. Auftretende Druckkräfte werden über Kontaktflächenpressung übertragen. Dieser Sachverhalt spiegelt sich exemplarisch in den Kraft- und Hysteresenverläufen der Abb. 3.27 und Abb. 3.28 wieder, welche unter einer Bewegungsamplitude von $\pm 1,1$ mm auf-

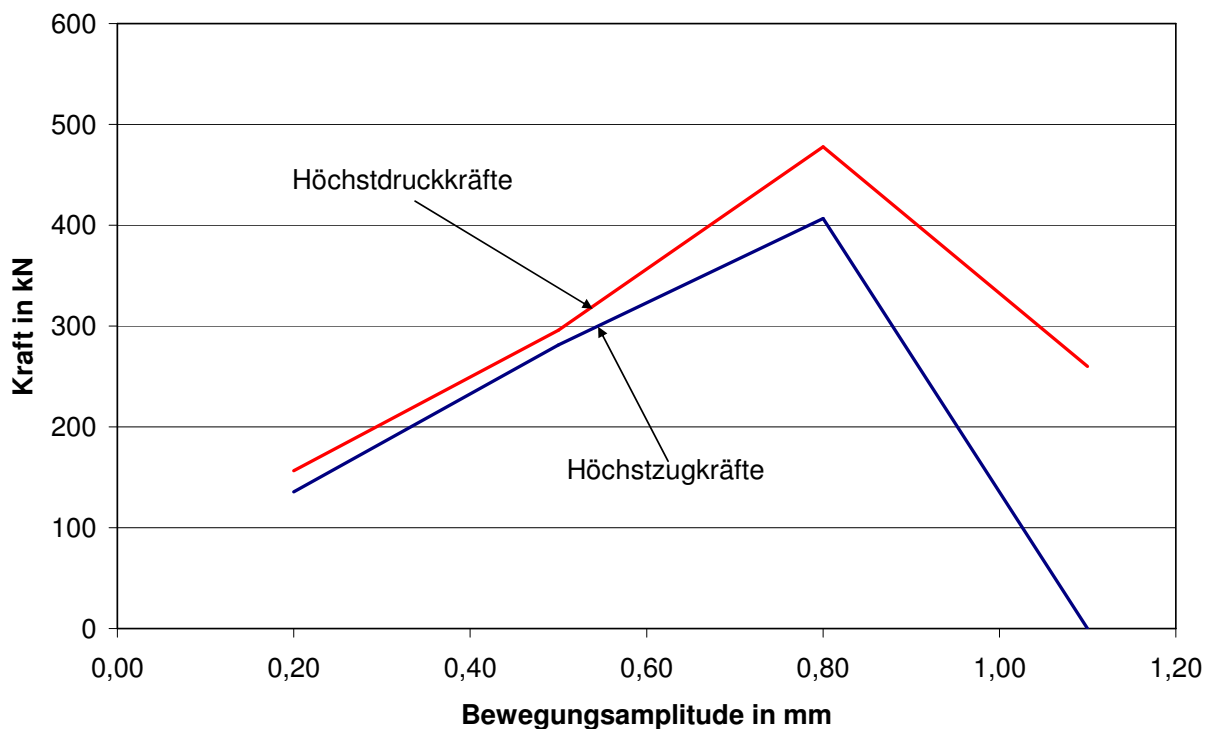


Abb. 3.24 Verlauf der maximalen Höchstzug- und Druckkräfte bei einer Frequenz von 0,25 Hz unter Berücksichtigung einer Mittelwertbildung aus den einzelnen Messergebnissen

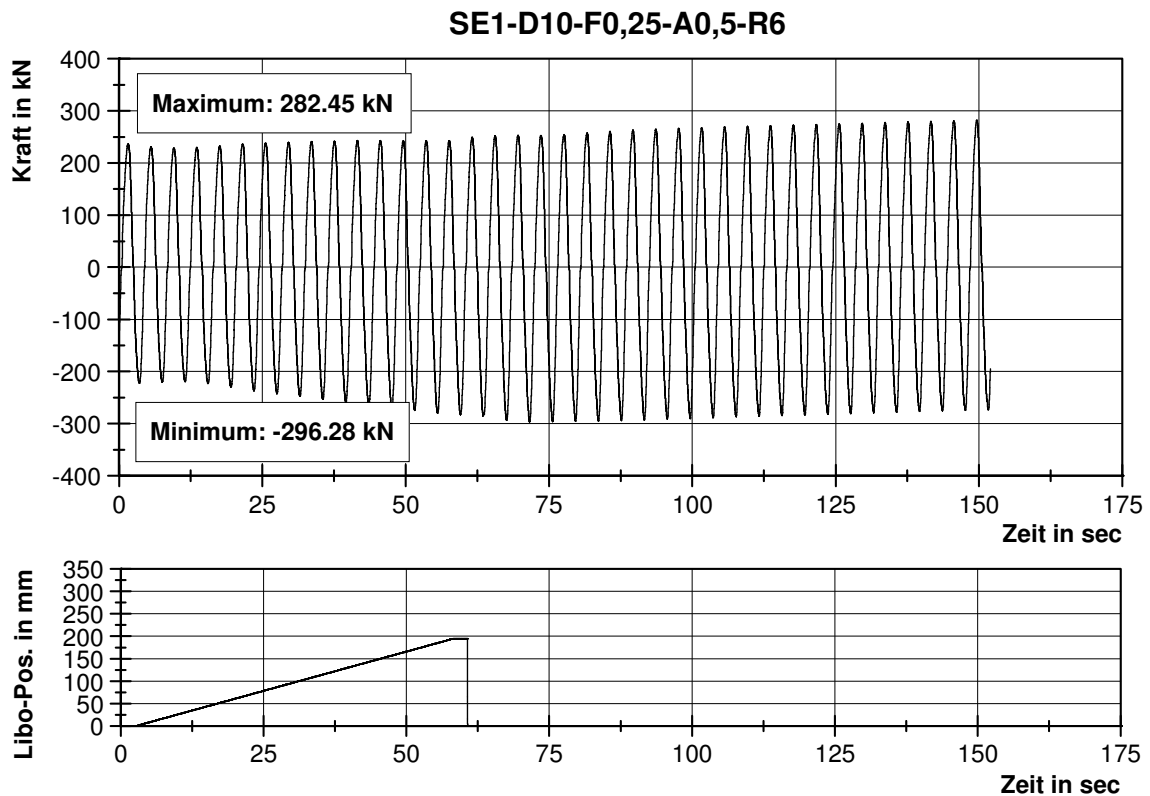


Abb. 3.25 Kraftentwicklung unter einer Amplitude von $\pm 0,5$ mm und einer Frequenz von 0,25 Hz

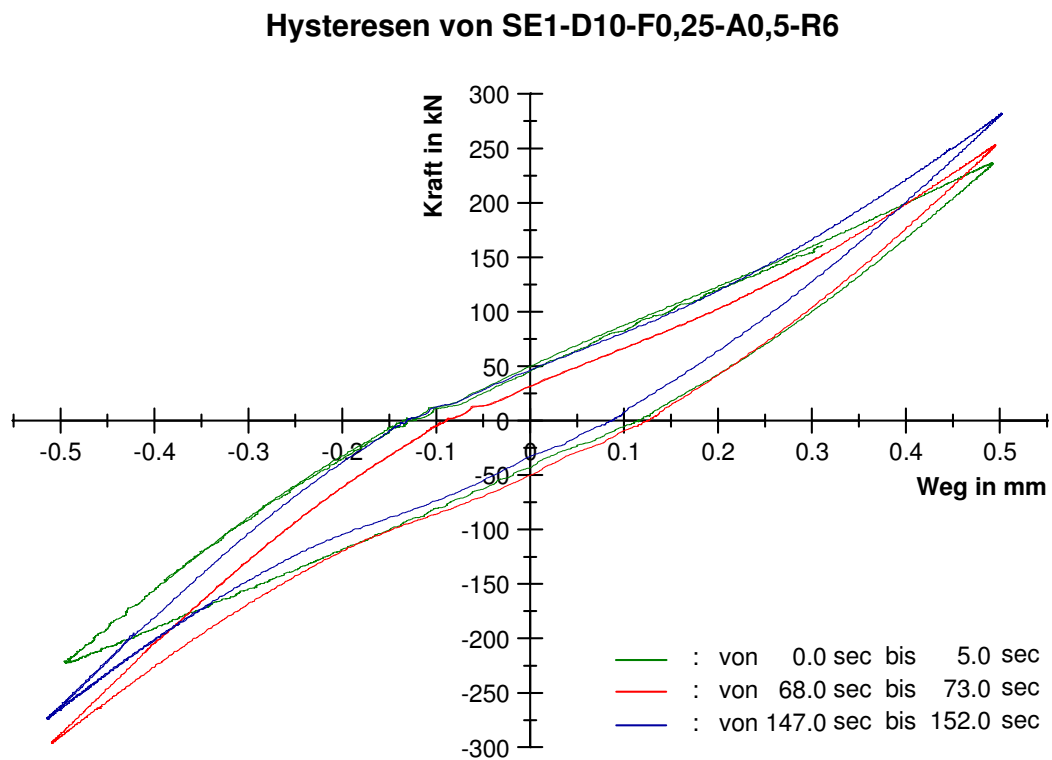


Abb. 3.26 Hysteresenentwicklung bei einer Bewegungsamplitude von $\pm 0,5$ mm und einer Frequenz von 0,25 Hz

genommen wurden. Der sich während des Schweißversuches darstellende Verlauf der Kraftentwicklung zeigt deutlich einen kontinuierlichen Abfall der im Versuch gemessenen Zugkraft bis auf Null. Dieser Abfall setzt bereits zu Beginn der Schweißung ein und deutet damit auf das mangelnde Vermögen des Schweißgutes hin, die auf den Versuchskörper einwirkenden Beanspruchungen duktil und kraftschlüssig aufzunehmen. Die im Versuchsverlauf einsetzende Rissbildung spiegelt sich in der gleichmäßigen Abnahme der Zugkraftanteile der abgebildeten Hysteresenschleifen wider. Kennzeichnend für die werkstoffliche Trennung des Versuchskörpers ist der Nullkraftverlauf der Hysteresenschleifen im Zugkraftbereich. Parallel zum Abbau der Zugkraft ist eine zunehmende Deformation der Hysteresenform im Druckbereich erkennbar. Die sich darstellende „Hakennase“ ist nach KRÜMMLING [1998] als ein typisches Anzeichen für eine Risschließung unter einer Druckbeanspruchung zu deuten. Neben den beschriebenen Effekten zeigen zwei der abgebildeten Hysteresenschleifen eine größere Überschreitung der vorgegebenen Bewegungsamplitude. Diese unplanmäßigen Ausschläge sind sowohl im Kraft- als auch Wegverlauf erkennbar und sind auf Regelfehler in der hydraulischen Wegsteuerung zurückzuführen, vgl. Abb. 3.27 und Abb. 3.29. Als Auslöser der Fehlregelung kann, aufgrund der vorhandenen Krafteinbrüche, ein schlagartiges Versagen von Teilen der Schweißnaht unterstellt werden. Infolge des lokalen Aufreißens der Schweißnaht kommt es zu einer sprunghaften Änderung des Steifigkeitsverhaltens der Schweißprobe. Diese Änderung löst eine Kompensationsantwort der Hydrauliksteuerung aus, um in den vorgeschriebenen Bewegungsablauf zurückzukehren.

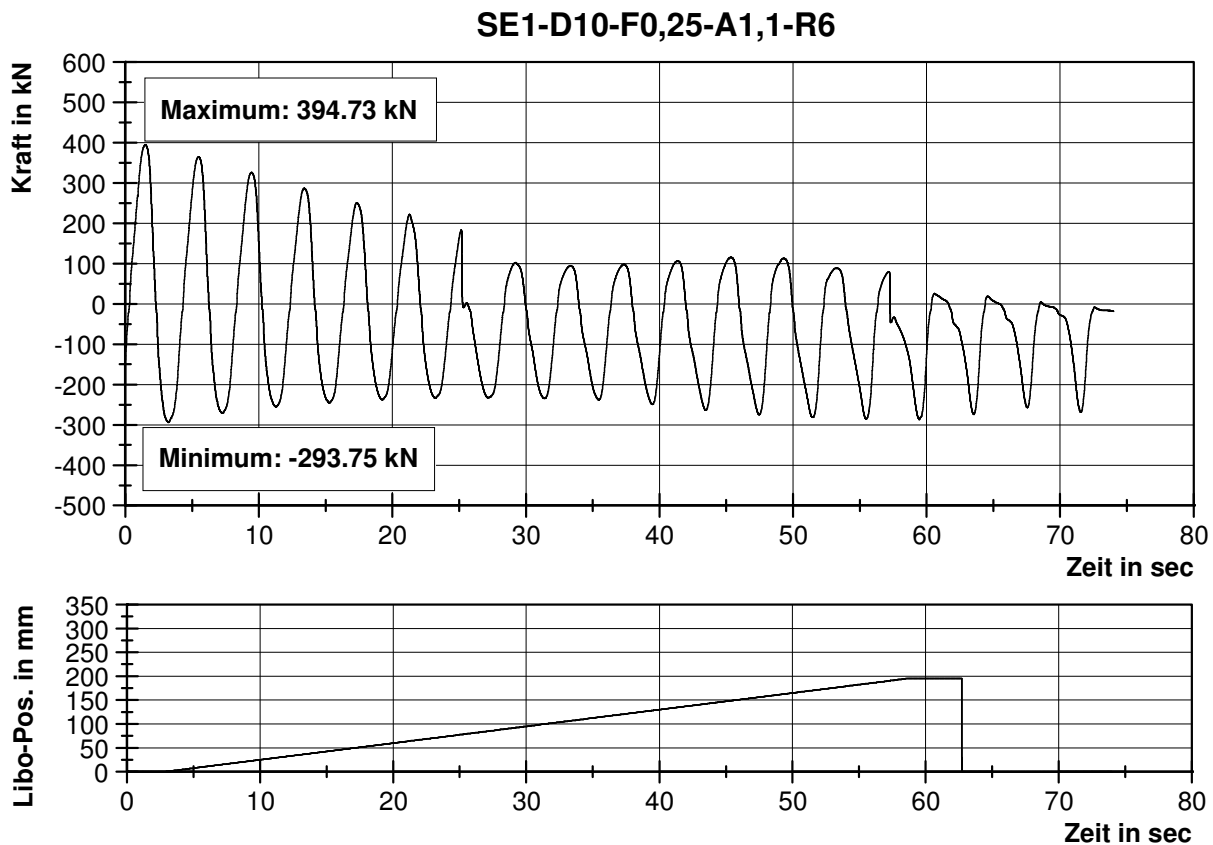


Abb. 3.27 Kraftentwicklung unter einer Amplitude von $\pm 1,1$ mm und einer Frequenz von 0,25 Hz

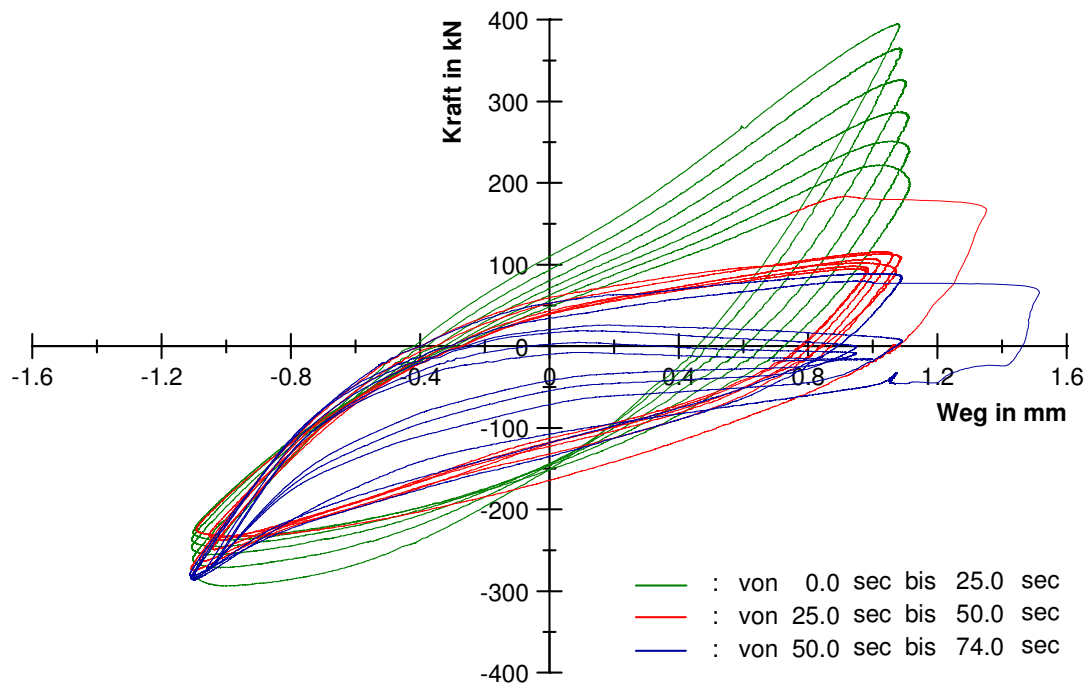
Hysteresen von SE1-D10-F0,25-A1,1-R6

Abb. 3.28 Hysteresenentwicklung bei einer Bewegungsamplitude von $\pm 1,1$ mm und einer Frequenz von 0,25 Hz

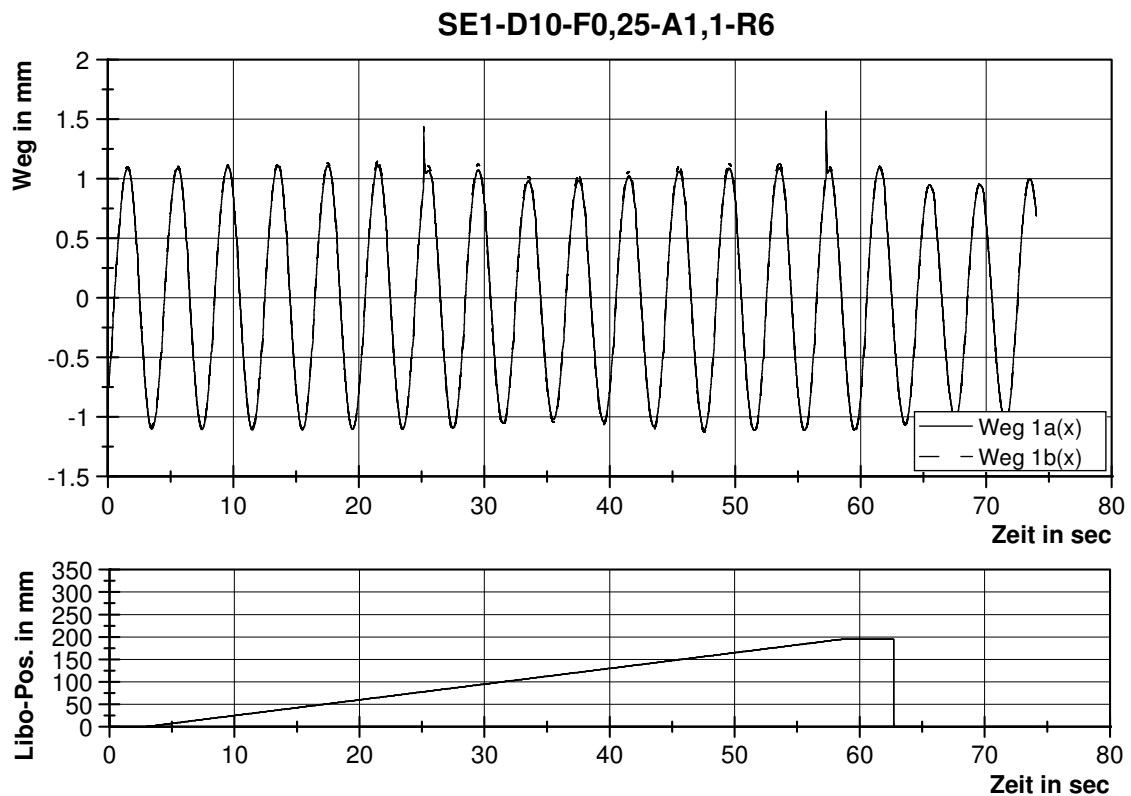


Abb. 3.29 Verlauf der Bewegungsamplituden für eine Bewegungsfrequenz von 0,25 Hz

Eine Aussage hinsichtlich des Einflusses der Bewegungsfrequenz auf die Schweißnahtgüte bzw. auf die Kraftentwicklung beim Schweißen kann nur sehr eingeschränkt erfolgen. Das untersuchte Parameterfeld für eine Schweißung mit Eigenbadsicherung weist ein zu grobes Raster auf, um eine zuverlässige Aussage zu ermöglichen. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass die Steigerung der Bewegungsamplitude zu einer Verschiebung des im Schweißversuch erreichbaren Kraftmaximums führt. Abb. 3.30 zeigt exemplarisch den Verlauf der gemessenen Höchstdruckkräfte. Beachtenswert ist der zunächst von der Bewegungsfrequenz unabhängige Anstieg der im Schweißversuch erreichten Höchstkräfte. Wie aus dem Diagramm ersichtlich, liegen die im Schweißversuch gemessenen Höchstdruckkräfte nahezu auf derselben Steigungsgeraden.

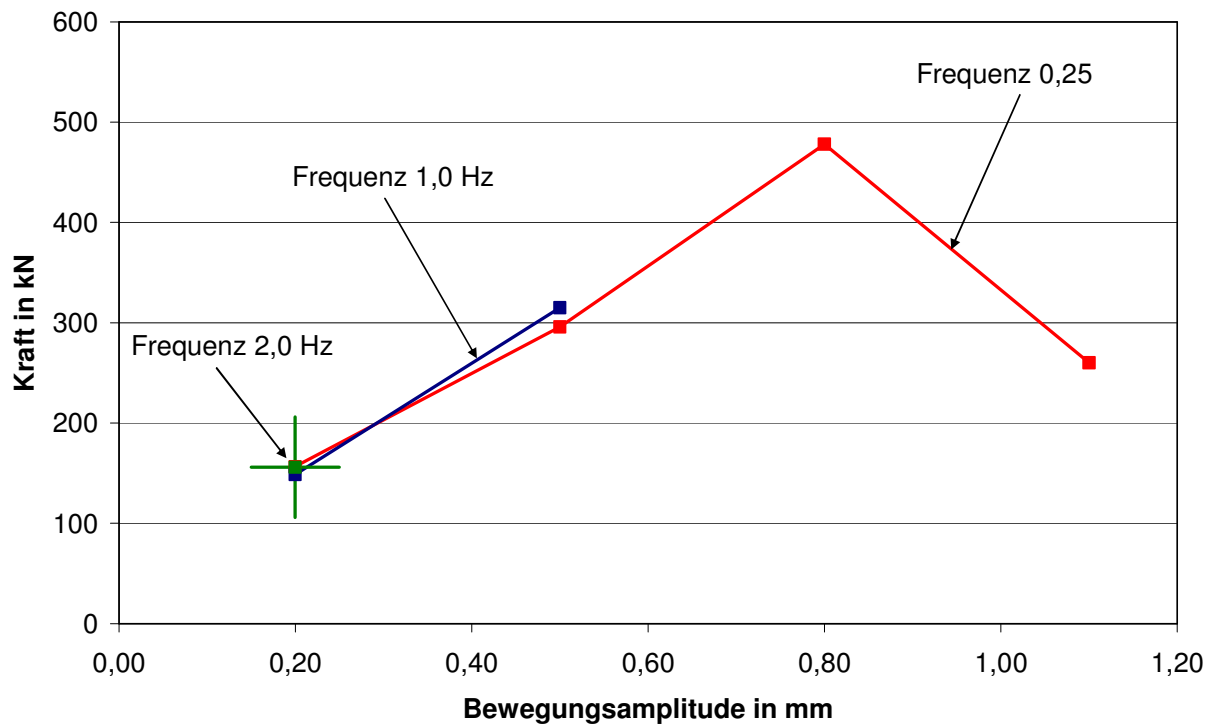


Abb. 3.30 Verlauf der Höchstdruckkräfte in Abhängigkeit von der Bewegungsfrequenz zum Zeitpunkt des Schweißendes bei vorhandener Eigenbadsicherung

Analog zu den im Kapitel 3.2.3.1 vorgestellten Ergebnissen wird das Nahtaussehen als auch das Rissverhalten der Schweißnaht durch die Bewegungsamplitude bzw. Bewegungsfrequenz maßgeblich beeinflusst. Um eventuell vorhandene Risse in der Schweißnahtoberfläche besser zu identifizieren, erfolgte eine Untersuchung sämtlicher Schweißproben mittels der Farbeindringprüfung. Eine Gegenüberstellung von Schweißproben gleicher Frequenz aber unterschiedlicher Bewegungsamplitude zeigt, dass es mit größer werdender Bewegungsamplitude zu einer ausgeprägteren Rissbildung in der Schweißnahtmitte kommt, vgl. Abb. 3.31. Deutlich zu erkennen ist die rissfreie Nahtoberfläche der unter einer Bewegungsamplitude von $\pm 0,2$ mm und einer Frequenz von 0,25 Hz hergestellten Schweißnaht. Im Gegensatz hierzu weist die unter einer Bewe-

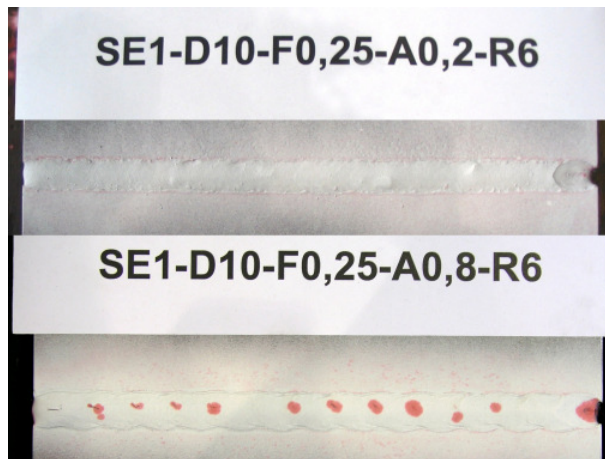


Abb. 3.31 Ausbildung der Schweißnaht unter einer Frequenz von 0,25 Hz und einer Bewegungsamplitude von $\pm 0,2$ und $\pm 0,8$ mm mit Badsicherung

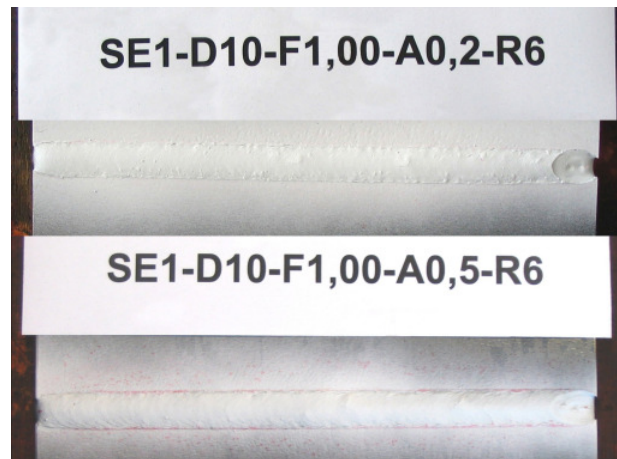


Abb. 3.32 Ausbildung der Schweißnaht unter einer Frequenz von 1,00 Hz und einer Bewegungsamplitude von $\pm 0,2$ und $\pm 0,5$ mm mit Badsicherung

gungsamplitude von $\pm 0,8$ mm hergestellte Schweißnaht deutliche Anrisse auf. Das vorhandene Rissmuster zeigt eine regelmäßige Rissanordnung, welche mit der Bewegungsfrequenz korreliert. Eine Steigerung der Bewegungsfrequenz führt, im Gegensatz zu den im Kapitel 3.2.3.1 vorgestellten Untersuchungen, nur zu einer bedingten Erhöhung der Rissempfindlichkeit. Die in Abb. 3.32 dargestellten Schweißnähte wurden unter einer Bewegungsfrequenz von 1,0 Hz hergestellt und weisen augenscheinlich keine Risse in der Schweißnahtoberfläche auf. Ein Aufbrechen der Schweißnähte zeigt jedoch, dass diese in der Schweißnahtmitte Risse aufweisen, welche nicht bis zur Schweißnahtoberfläche reichen und somit nicht durch die Farbeindringprüfung erkannt werden können. Als ursächlich für das duktilere Verhalten der Schweißnähte mit Badsicherung, gegenüber den Schweißnähten ohne Badsicherung, kann der vorhandene Restquerschnitt der Schweißproben angesehen werden. Eine genauere Betrachtung der sich darstellenden Risse zeigt, dass der Rissursprung in der Schweißnahtwurzel liegt. Durch die vorhandene Badsicherung wird, bei ausreichend kleinen Bewegungsamplituden, ein wurzelseitiges Öffnen der entstehenden Risse vermieden. Eine Oxidation der Rissflächen kann somit nicht stattfinden. Es scheint daher möglich, dass es während der Druckphase der Probenbeanspruchung neben der Risschließung zu einem teilweisen Verschweißen der Anrisse kommt, wodurch ein Risswachstum abgeschwächt wird. Eine weitere Erklärung für die größere Duktilität ist in der Möglichkeit zu sehen, dass die aufgebrachte Bewegungsamplitude nicht vollständig in eine Bewegung der Nahtflanken umgesetzt wird. Eine abschließende Beurteilung ist jedoch aufgrund der mangelnden Kenntnis zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht möglich.

Analog zum Rissverhalten wird das Aussehen der Schweißnaht durch die Größe der aufgebrachten Bewegungsamplitude sowie der Frequenz beeinflusst. Eine Vergrößerung der Nahtflankenbewegung führt zu einer ausgeprägteren Schweißnahtschuppung. Anzahl und Abstand der Schuppen orientieren sich an der vorherrschenden Bewegungsfrequenz, siehe Abb. 3.31 und Abb. 3.32.

3.3.3.2 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse und Schlussfolgerungen

Wie im vorhergehenden Abschnitt vorgestellt, ist das Verschweißen eines ausgefugten Risses unter Bewegung der Nahtflanken grundsätzlich möglich. Für die experimentellen Untersuchungen wurden 10 mm starke Blechproben aus S355J2G3 mit einer 6 mm tiefen v-förmigen Schweißnahtvorbereitung versehen. Die Beanspruchung der Proben erfolgte über die gesamte Versuchsdauer in reiner Wegregelung, unter Vorgabe einer Bewegungsamplitude und Frequenz. Das Abschweißen des simulierten Anrisses erfolgte mittels automatisierter MAG-Schweißung.

Mit den durchgeführten Versuchen konnte gezeigt werden, dass das Verschweißen eines Anrisses bis zu einer Frequenz von 2,0 Hz sowie einer Bewegungsamplitude bis zu $\pm 1,1$ mm möglich ist. Die während der Versuchsdurchführung gemessenen Kräfte weisen eine enge Korrelation zur Größe der Bewegungsamplitude bzw. der Frequenz auf. Eine Vergrößerung der Bewegungsamplitude führt zu einem Anstieg der im Versuch messbaren Höchstkräfte von Zug und Druck. Der Anstieg der gemessenen Höchstkraftverläufe erreicht in Abhängigkeit von der Bewegungsfrequenz ein Maximum, welches die Grenze der technisch sinnvollen Schweißung mit üblichen Verfahren kennzeichnet. Hervorzuheben ist, dass die sich darstellenden Anstiege der Höchstkräfte unabhängig von der Bewegungsfrequenz sind und bis zur untersuchten Grenze von 2,0 Hz identische Verläufe aufweisen, vgl. Abb. 3.30.

Die nähere Untersuchung der hergestellten Schweißnähte zeigt eine durchgehende Schädigung der hergestellten Schweißnähte infolge Rissbildung in der Schweißnahtmitte. Rissabstand und Rissgröße weisen eine Korrelation zur Bewegungsamplitude und Frequenz auf. Im Vergleich zu den im Kapitel 3.2 vorgestellten Schweißversuchen bei anfänglicher Probentrennung zeigt sich ein positiver Einfluss der Eigenbadsicherung auf die erreichbare Größe der Bewegungsamplitude.

Mit Blick auf die Größe des untersuchten Parameterfeldes muss angemerkt werden, dass die dargestellten Ergebnisse nur eine Tendenz aufzeigen können. Für eine abschließende Aussage ist das Parameterfeld zu verfeinern. Die gewonnenen Erkenntnisse können jedoch als Anhaltswerte über mögliche Grenzen dienen.

Kapitel 4

Tragfähigkeitsuntersuchung der Schweißverbindungen

4.1 Allgemeine Überlegungen und Vorgehensweise

Für die Baupraxis steht die Frage nach dem Trag- und Duktilitätsverhalten von unter Betriebsbeanspruchung hergestellten Schweißnähten im Vordergrund, soll die Möglichkeit des Schweißens bei sich bewegenden Nahtflanken im Alltag des Bauens Anwendung finden. Die Qualitäts- bzw. Eigenschaftsanforderungen, welche an herkömmliche Schweißverbindungen gestellt werden, sind größtenteils in den einschlägigen Normen (z.B. DIN EN 288, DIN 18800) festgelegt. Jedoch gehen die darin enthaltenden Forderungen von einer Schweißung in Ruhe aus, so dass eine Übertragung auf Schweißnähte, die unter Betriebsbeanspruchung hergestellt wurden, nur bedingt möglich erscheint. Um dennoch eine Aussage hinsichtlich der Tragfähigkeit der unter Nahtflankenbewegung hergestellten Schweißnähte treffen zu können, wurden Querkzugversuche in Anlehnung an die DIN 10002 durchgeführt und mit den Untersuchungsergebnissen der in Ruhe geschweißten Proben verglichen. Bei dieser Betrachtung muss berücksichtigt werden, dass die vorliegenden Schweißnähte gewisse Streuungen in der Güte, insbesondere über die Nahtlänge, aufweisen können. Gründe hierfür liegen u. a. in der Kopplung des instationären Wärmefelds mit den Einwirkungen der äußeren Beanspruchung oder in den Veränderungen der Nahtgeometrie während des Schweißprozesses. Beispielhaft ist das von SCHIEBEL [1998] beschriebene Schließen des Schweißnahtspaltes während der Versuchsdurchführung zu nennen, welches aus der Nachgiebigkeit des Versuchsaufbaus resultierte.

Zur Charakterisierung des Verhaltens der einzelnen Zugproben und damit der untersuchten Schweißnähte wurden die im Zugversuch aufgenommen Kraft-Weg-Beziehungen ausgewertet. Neben der Ermittlung der maximalen ertragbaren Zugkraft erfolgte die Bestimmung der Bruchdehnung, so dass zusätzlich zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens eine Aussage zur Duktilität der Zugprobe und damit der Schweißverbindung möglich ist. Von besonderem Interesse ist das lokale Verhalten der Schweißnähte unter einer Kraftbeanspruchung. Zur Erfassung der lokalen Nahtverformungen wurde ein, die Schweißnaht überspannendes, Extensometer an den Zugproben befestigt. Rissaufweitungen und damit die kraftseitige Entlastung der Zugproben können so erkannt und analysiert werden.

4.2 Versuchseinrichtung und Aufbau

Für die Durchführung sämtlicher Zugversuche wurde eine servohydraulische Universalprüfmaschine der Firma Schenk eingesetzt, welche zur Aufnahme der Zugproben mit zwei hydraulischen Spannköpfen ausgestattet ist, vgl. Abb. 4.1. Die in den Spannköpfen eingebauten keilförmigen Spannbacken waren selbstsichernd, so dass eine ausreichend schlupffreie Fixierung der Proben gewährleistet war. Abb. 4.2 zeigt eine in den Versuchstand eingebaute Flachzugprobe. Der in die Prüfmaschine eingebaute hydrostatisch gelagerte Zylinder erlaubt eine nahezu slip-stick-freie Kraftbeanspruchung der Versuchskörper bis rd. ± 160 kN. Sämtliche hydraulische Komponenten werden über ein zentrales 280 bar Hydrauliksystem mit Energie versorgt.

Die Ansteuerung der Prüfmaschine sowie die Erfassung der Versuchsdaten erfolgte mittels einer Hydraulikregelung vom Typ Testar Ilm[®] der Firma MTS. Zur Programmierung der Regelung sowie Speicherung der Versuchsdaten wurde ein handelsüblicher PC mit entsprechender Versuchssoftware der Firma MTS verwendet. Regelungsart, Verfahrensgeschwindigkeit des Prüfzylinders, Steuerungsgrenzwerte und Abtastrate der Messwerteerfassung wurden programmseitig hinterlegt, so dass eine automatisierte Versuchsdurchführung erfolgte.

Die Messung der axialen Prüfkraft erfolgte mittels einer in den Laststrang eingebauten Kraftmessdose vom Typ UBV[®] der Firma GTM, welche eine Genauigkeitsklasse von 0,5 und einen Messbereich von ± 160 kN aufwies. Zur Wegregelung und Positionierung des Prüfzylinders wurde ein induktiver Wegmesssensor mit einem kalibrierten Messbereich von 100 mm verwendet. Das Messen der im Zugversuch auftretenden lokalen Verformungen im Schweißnahtbereich erfolgte mittels eines Extensometers vom Typ MTS 632.31F-24[®]. Der maximale Öffnungsweg des Extensometers betrug 4 mm, bei einem Schneidenabstand von 20 mm. Die Messung der lokalen Verformung wurde nach 1 mm lokaler Weglängung unterbrochen und das Extensometer entfernt, um Schäden an den Prüfmitteln infolge eines plötzlichen Versagens der Zugprobe zu vermeiden.



Abb. 4.1 Universalprüfmaschine

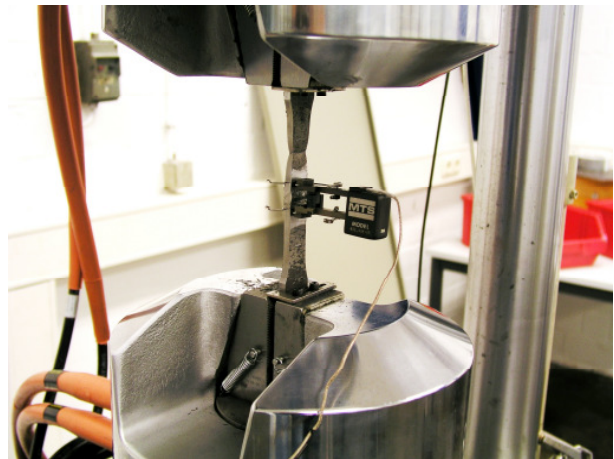


Abb. 4.2 Spannköpfe mit Flachzugprobe

4.3 Tragfähigkeitsuntersuchung der Schweißproben mit anfänglicher Probentrennung

4.3.1 Probenform, Herstellung und Versuchsdurchführung

Zur Beschreibung des mechanisch, technologischen Verhaltens der unter Nahtflankenbewegungen hergestellten Schweißnähte wurden Zugversuche in Anlehnung an DIN 10002 durchgeführt und mit den Ergebnissen der in Ruhe geschweißten Proben verglichen. Die Grundlage dieser Betrachtung stellen die im Kapitel 3.2 beschriebenen Schweißversuche sowie die sich daraus ergebenden Schweißproben dar. In einem ersten Arbeitsschritt wurden aus den hergestellten Schweißproben Flachzugproben mittels CNC-gesteuerter Fräsung entnommen. Abb. 4.3 zeigt die den Zugversuchen zugrunde liegende Probengeometrie. Um Einflüsse aus der Streuung der Schweißnahtgüte über die Schweißnahtlänge zu erfassen, erfolgte die Probenentnahme in regelmäßigen Abständen von 50 mm über die Gesamtlänge der Schweißnaht, vgl. Abb. 4.4. Aus jeder Schweißprobe konnten somit 6 Zugproben für die Untersuchung gewonnen werden. Die Bezeichnung der Zugproben orientiert sich am Startpunkt der Schweißung und beginnt mit „T1“. Nach der Probenentnahme wurden diese gekennzeichnet und mit Rissmarken zur späteren Bruchdehnungsbestimmung versehen.

Das Messen der lokalen Dehnungen im Bereich der Schweißnaht erfolgte durch Verwendung eines Extensometers, welches mittels Federklemmung auf die jeweilige Zugprobe aufgespannt wurde. Infolge der beim Zugversuch auftretenden Dehnungen der Probe kam es zum gelegentlichen Abplatzen vorhandener Walzhautrückstände und Oxidschichten. Dieses Abplatzen gefährdete zum Teil den sicheren Schneidensitz des verwendeten Extensometers. Um eine einwandfreie Messung sicherzustellen, wurden daher im Bereich der Messschneiden vorhandene Oberflächenverschmutzungen durch leichtes Bürsten mit einer Drahtbürste entfernt, ohne eine Probenschwächung vorzunehmen.

Nach der Probenherstellung und Präparation wurden diese eingemessen und in die Prüfmaschine eingebaut. Der sich anschließende Zugversuch erfolgte in reiner Wegregelung. Die Festlegung der Verfahrensgeschwindigkeiten des Prüfzylinders orientier-

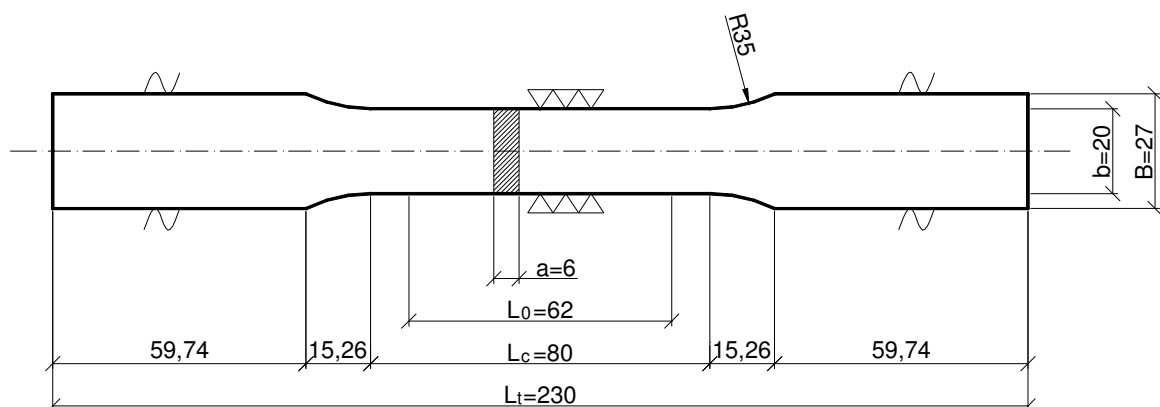


Abb. 4.3 Probengeometrie Flachzugprobe $t=6\text{ mm}$

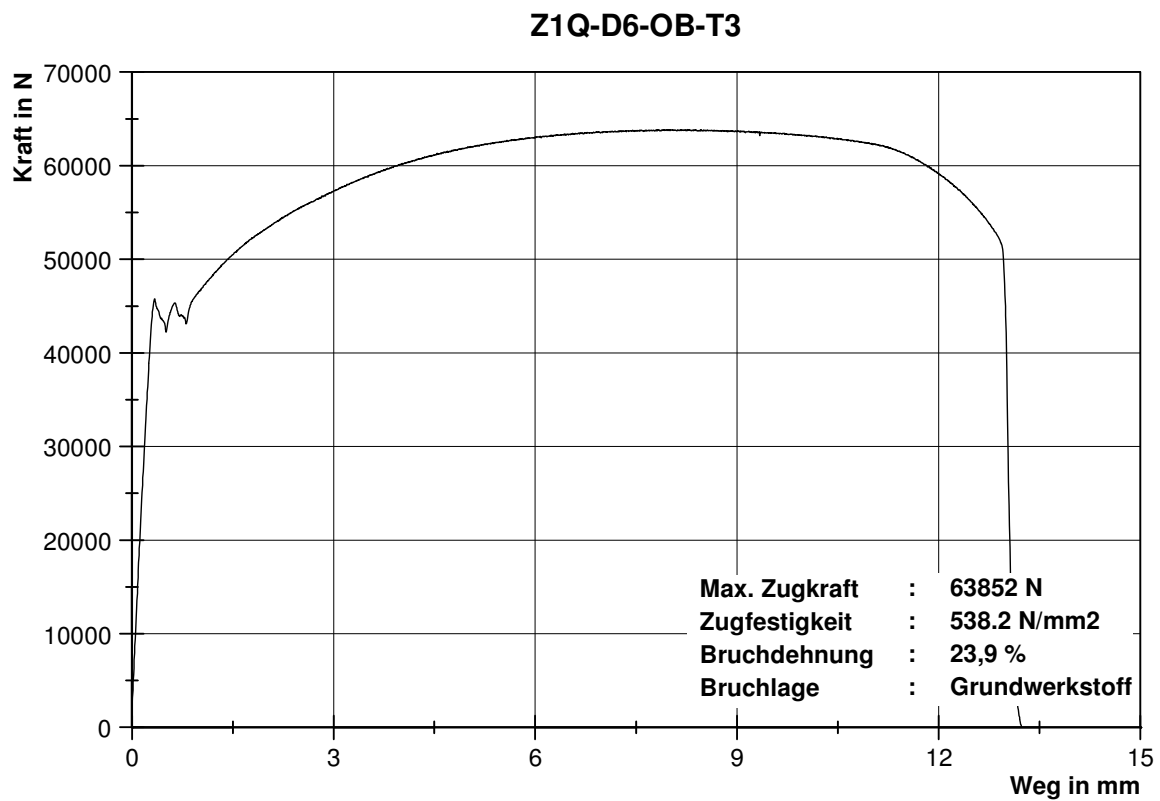


Abb. 4.5 Kraft-Weg-Diagramm für eine Schweißung in Ruhe, Blechstärke 6 mm, S355 J2 G3

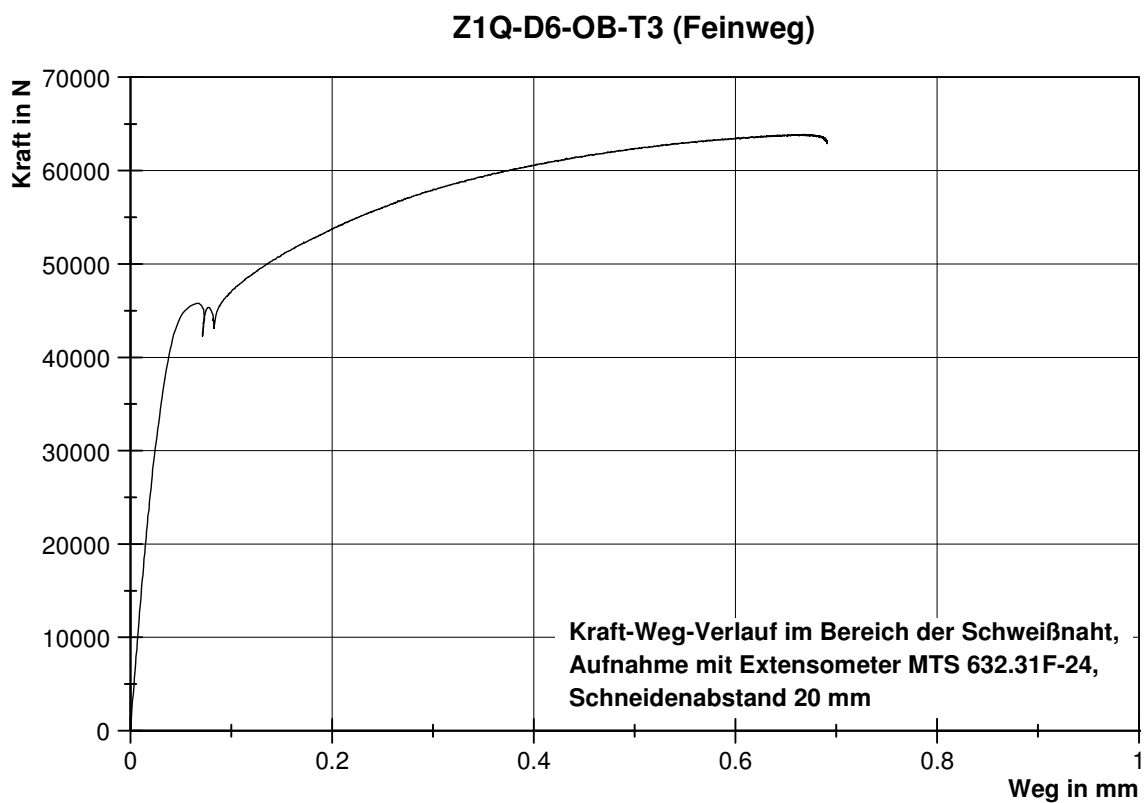


Abb. 4.6 Lokales Kraft-Weg-Diagramm im Bereich der Schweißnaht, Blechstärke 6 mm

Zur Charakterisierung der Schweißnahtqualitäten untereinander als auch über die Schweißnahtlänge wurden die sich aus den Zugversuchen ergebenden Höchstkräfte sowie Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen bestimmt und miteinander verglichen. Abb. 4.7 zeigt den Verlauf der ermittelten Höchstzugkräfte über die Länge der Schweißnähte. Aus der Darstellung ist ersichtlich, dass die Kraftverläufe nur eine geringe Schwankungsbreite untereinander und längs der Schweißnaht aufweisen. Die mittlere Höchstzugkraft über alle Zugproben ergab sich zu 63714 N. Ein analoges Bild stellt sich für die Spannungsverläufe der Zugfestigkeit dar, vgl. Abb. 4.8. Der Mittelwert der Zugfestigkeit wurde zu 536 N/mm^2 bestimmt und weist eine mittlere Streuung von $\pm 2 \%$ auf. Im Gegensatz zu den Kraft- und Spannungsverläufen besitzt der Verlauf der Bruchdehnung eine größere Schwankungsbreite, vgl. Abb. 4.9. Deutlich zu erkennen sind die Einbrüche im Bruchdehnungsverlauf für die Proben „SE2-T4“ (Lage 175 mm) und „SE1-T5“ (Lage 225 mm). Eine genauere Untersuchung der Proben zeigte, dass diese in der Schweißnaht gerissen waren. Ausgangspunkt der Anrisse war eine mechanische Kerbe, welche vermutlich aus der Probenbearbeitung (Gratentfernung) herrührte. Unter Berücksichtigung dieser beiden „Ausreißer“ ergibt sich die durchschnittliche Bruchdehnung zu 21,02 %. Die kleinste Bruchdehnung wurde von der Zugprobe „SE2-T4“ erreicht und betrug 12,91%.

Generell ist festzustellen, dass die Qualität der durchgeführten Schweißung, mit Blick auf die geringe Streuungsbreite, als außerordentlich gut zu bezeichnen ist. Gravierende Abweichungen oder Ausschläge im Kraft- und Spannungsverlauf sind nicht vorhanden. Diese Aussage gilt sowohl für die Eigenschaften der Schweißproben zueinander als auch über die Schweißnahtlänge. Es ist davon auszugehen, dass sowohl die Schweißnahtvorbereitungen als auch die Durchführung der Schweißung einwandfrei waren. Die durchgeführten Referenzschweißungen können somit als Bezugsbasis un-

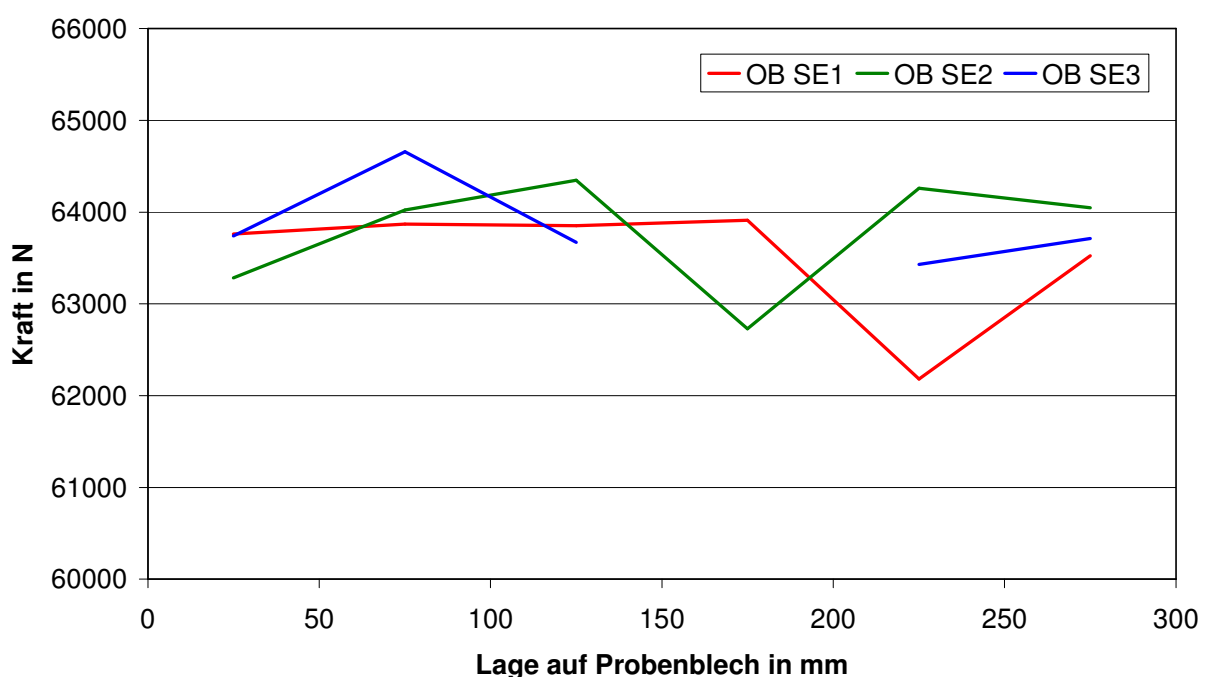


Abb. 4.7 Entwicklung der Höchstzugkraft über die Schweißprobenbreite, Blechstärke 6 mm

eingeschränkt verwendet werden. Abschließend muss angemerkt werden, dass die automatisierte Versuchsdurchführung eine günstige Auswirkung auf die Nahtqualität besitzt. Streuungen durch menschliche Einflüsse finden bei der Untersuchung daher keine Berücksichtigung.

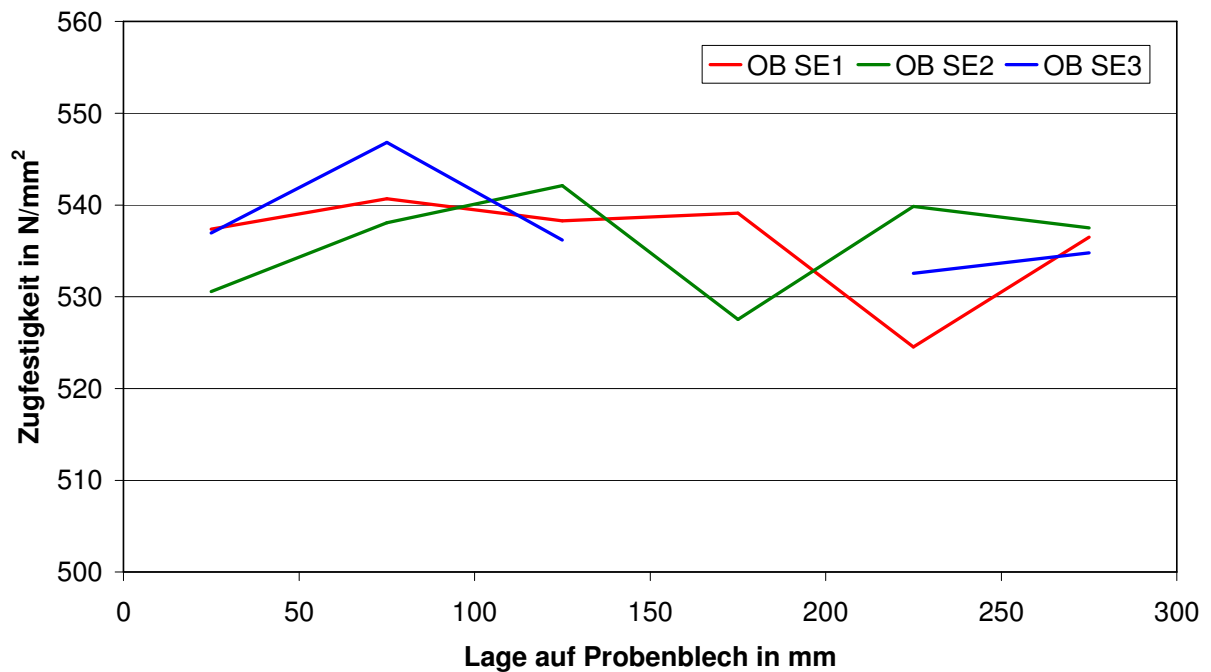


Abb. 4.8 Entwicklung der Zugfestigkeit über die Schweißprobenbreite, Blechstärke 6 mm

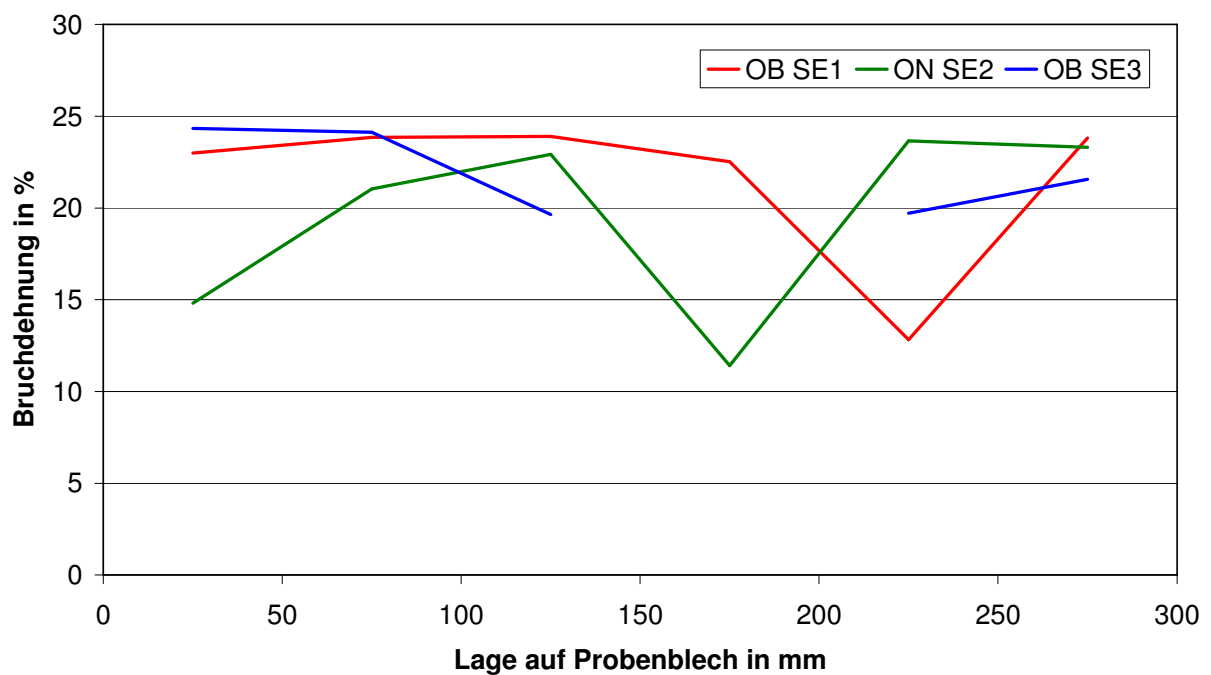


Abb. 4.9 Entwicklung der Bruchdehnung über die Schweißprobenbreite, Blechstärke 6mm

4.3.3 Zugversuche an Schweißproben mit anfänglicher Probentrennung

Die Bewegung der Nahtflanken während des Schweißprozesses führt zu einer Schädigung der Schweißnaht durch Rissbildung in der Schweißnahtmitte. Rissgröße und Anzahl stehen in Korrelation mit der Bewegungsfrequenz sowie Größe der Bewegungsamplitude, vgl. Kapitel 3.2. Daraus folgt eine direkte Abhängigkeit zwischen der Nahtschädigung und der im Zugversuch erreichten maximalen Kraft. Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den Zugversuchen an Proben, welche unter einer Nahtflankenbewegung verschweißt wurden, mit den Proben, die während der Schweißung keine Beanspruchung erfahren haben, verdeutlicht diesen Sachverhalt. Abb. 4.10 zeigt die Abhängigkeit der Tragfähigkeit der Schweißverbindung von dem Vorhandensein einer Bewegungsamplitude bzw. Frequenz. Die Tragfähigkeit der Verbindung stellt sich als das Verhältnis der Mittelwerte aus den Zugversuchen mit und ohne Bewegung dar. Der Mittelwert aller 6 Zugproben aus dem jeweiligen Schweißversuch unter Bewegung wird in einem Bezug zur Referenz aus den Schweißversuchen in Ruhe gesetzt. Als Referenzgröße der Ruheschweißung wurde der Mittelwert aller Zugproben aus den drei durchgeführten Referenzschweißungen in Ruhe gewählt. Wie aus dem Diagramm ersichtlich, kommt es sowohl mit der Zunahme der Bewegungsamplitude als auch der Frequenz zu einem Abfall der maximalen Zugfestigkeit der Schweißverbindung. Auffällig erscheint der zunächst gemäßigte Abfall der Tragfähigkeit mit Steigerung der Bewegungsamplitude bzw. Frequenz. Ähnlich dem Verlauf der gemessenen Höchstkräfte

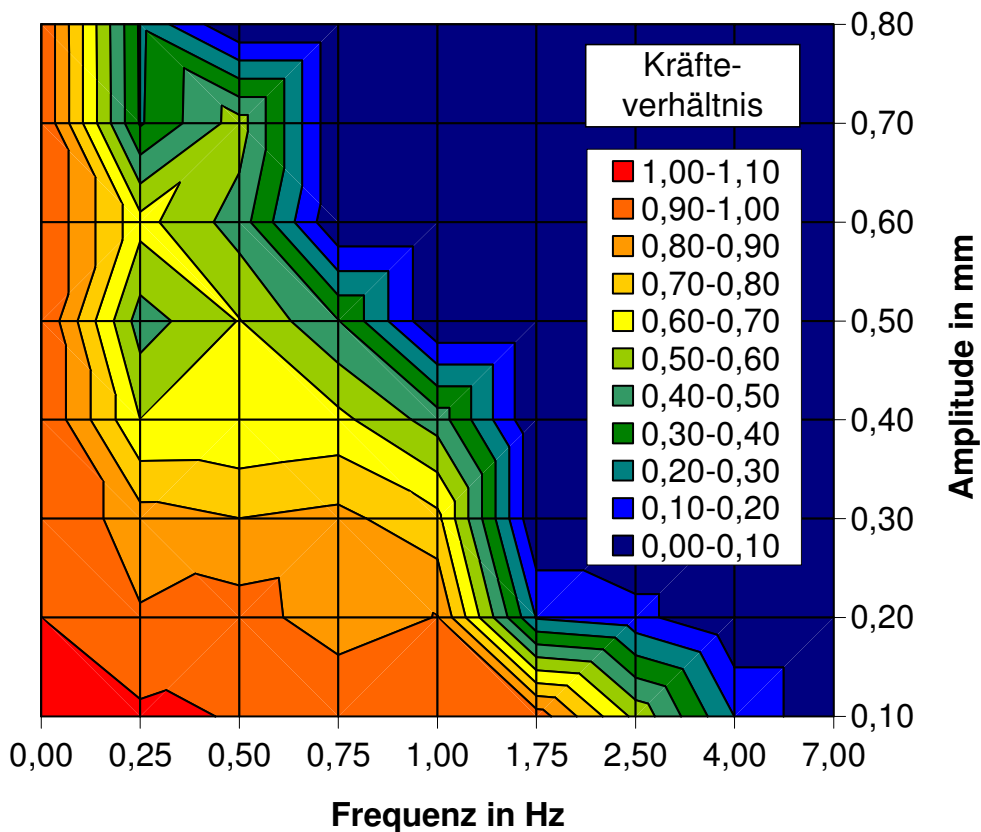


Abb. 4.10 Verhältnis der Höchstzugkräfte im Zugversuch unter Bewegung/Ruhe

beim Schweißversuch, kommt es ab einer bestimmten Amplitude zu einem signifikanten Abfall des Kräfteverhältnisses. Wird als technisch sinnvolle Grenze für die Schweißung unter Bewegung eine Tragfähigkeit von 50% gegenüber einer Schweißung in Ruhe unterstellt, so lässt sich feststellen, dass Schweißungen bis zu Bewegungsamplituden von $\pm 0,6$ mm und Frequenzen von maximal 2,5 Hz mit herkömmlichen Schweißverfahren und ohne zusätzliche Maßnahmen möglich sind.

Das Verhalten der über die Länge der Schweißnaht entnommenen Zugproben weist hinsichtlich der Zugkraft keine signifikanten Streuungen auf. Abb. 4.11 stellt exemplarisch den Verlauf der im Zugversuch bestimmten Höchstzugkräfte über die Schweißprobenbreite für eine Frequenz von 0,25 Hz dar. Eine genauere Betrachtung zeigt, dass die Schwankungsbreite der Kräfte bis zu einer Bewegungsamplitude um $\pm 0,5$ mm im unteren Bereich normaler Versuchstoleranz liegt. Die Kraftverläufe der Bewegungsamplituden $\pm 0,7$ mm und $\pm 0,8$ mm zeigen hingegen, dass es mit zunehmender Entfernung zum Startpunkt der Schweißung zu einem Anstieg der im Zugversuch gemessenen maximalen Zugkraft kommt. Das Vorliegen dieses Kraftanstiegs bei größeren Bewegungsamplituden kann dadurch erklärt werden, dass die Schweißnaht, aufgrund der Risschädigung in der Schweißnahtmitte, eine geringere „Lebensdauer“ hinsichtlich der dynamischen Beanspruchung durch die Bewegungsamplitude aufweist. Die zu Beginn des Schweißversuches eingebrachten Anteile der Schweißnaht sind einer ungleich höheren Anzahl an Lastwechseln ausgesetzt als die zuletzt eingebrachten Nahtanteile. Es kann daher postuliert werden, dass der Anstieg im Zugkraftverlauf über die Schweißnahtlänge auf den unterschiedlichen Ermüdungsgrad der einzelnen Schweißnahtabschnitte zurückzuführen ist. Es gilt dabei, dass die Größe der Bewe-

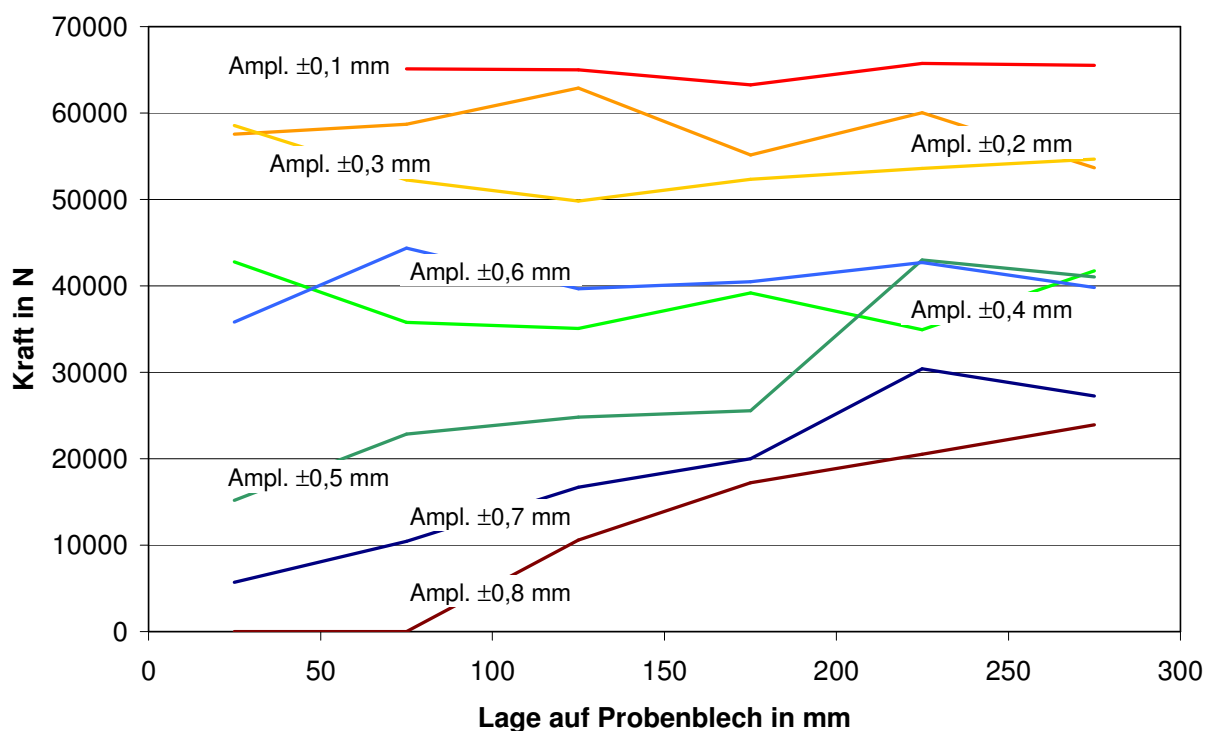


Abb. 4.11 Höchstzugkraft über die Schweißprobenbreite für eine Frequenz von 0,25 Hz

gungsamplitude einen signifikanten Einfluss auf die temporäre Standfestigkeit der Schweißnaht sowie das Wachsen der Risse in der fertigen Schweißnaht hat. Dieser These folgend erklärt sich das Rissverhalten der in Abb. 3.15 und 3.16 dargestellten Schweißnähte. Ausgehend vom Startpunkt der Schweißung kommt es zu einem Anwachsen der Anrisse, bis diese sich schließlich zu einem durchgehenden Riss vereinigen. Für die untersuchten Zugproben hat dies zur Folge, dass im Anfangsbereich der Schweißnaht wesentlich weniger Materialquerschnitt zur Kraftübertragung zur Verfügung steht. Einflüsse aus der Art der Versuchsdurchführung können als Ursache für den Kraftanstieg daher ausgeschlossen werden, zusätzlich tritt der Anstieg der Zugkraft ausschließlich bei höheren Amplituden der jeweiligen Frequenz auf. Es lässt sich jedoch vermuten, dass es mit steigender Schweißnahtlänge zu einem Absinken der Festigkeit infolge Ermüdung, auch bei kleineren Bewegungsamplituden, kommt. Weiterführende Betrachtungen zeigen, dass eine mögliche Korrelation zwischen dem bewegungsamplitudenabhängigen Abknicken des im Schweißversuch gemessenen Höchstkraftverlaufs (vgl. Kapitel 3.2.3.1) und dem Auftreten des Kraftanstiegs ab einer bestimmten Bewegungsamplitude im Verlauf der Zugfestigkeit über die Schweißprobenbreite besteht.

Im Gegensatz zur statischen Tragfähigkeit der Schweißnähte, die einen kontinuierlichen, linearen Abfall im Bereich zwischen $\pm 0,4$ mm und 1 Hz aufweist, erfährt die Bruchdehnung bereits bei kleinsten Bewegungsamplituden und Frequenzen einen dramatischen Abfall, vgl. Abb. 4.12. Wie aus dem Diagramm ersichtlich, verursacht die

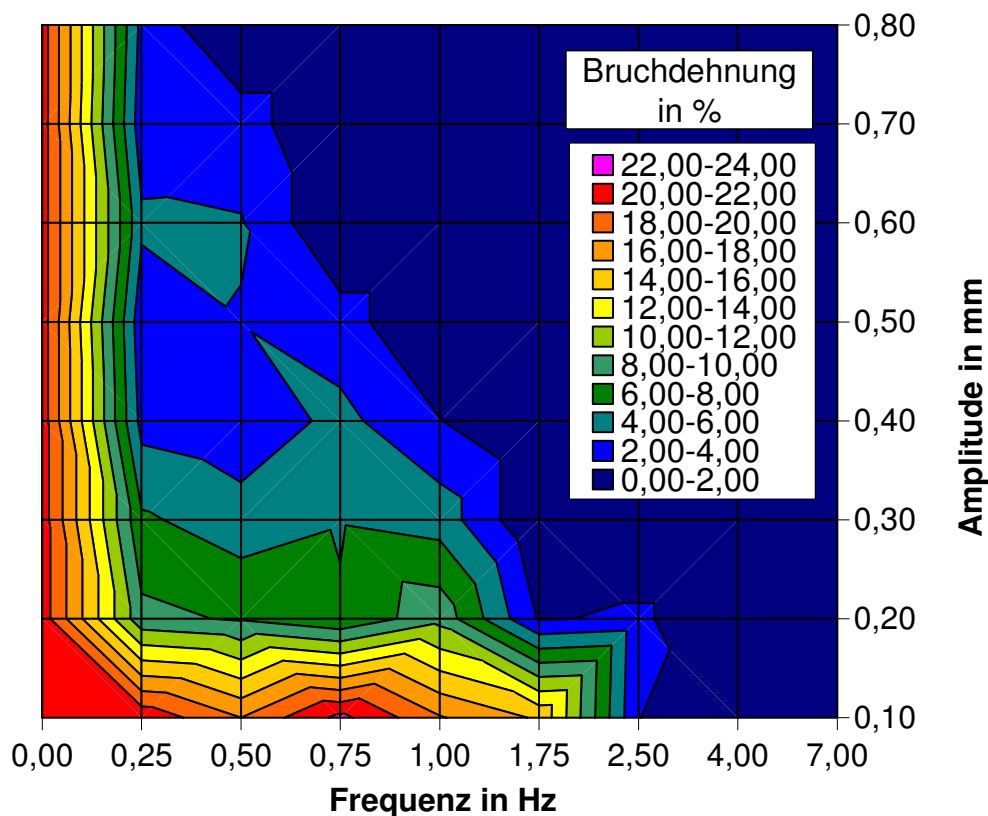


Abb. 4.12 Mittlere Bruchdehnung der Zugproben

Vergrößerung der Bewegungsamplitude von $\pm 0,1$ mm auf $\pm 0,2$ mm ein Absinken der Bruchdehnung von 20% auf 6%. Gleichzeitig stellt sich ein zunehmend sprödes Versagen der Zugproben ein. Sämtliche Schweißproben weisen im Zugversuch einen nahezu verformungslosen Bruch in der Schweißnahtmitte auf. Das Versagensbild der Zugproben ist dabei unabhängig von der Lage in der jeweiligen Schweißprobe. Einzige Ausnahme bilden die, aus den Schweißversuchen im Bereich der Bewegungsamplitude $\pm 0,1$ mm bis zu einer Frequenz von 0,75 Hz, gewonnenen Zugproben. Diese weisen Brüche sowohl im Grundwerkstoff als auch in der Schweißnahtmitte auf.

Das Verhalten der Bruchdehnung über die Schweißnahtlänge zeigt hinsichtlich der Streuung ein anfänglich analoges Verhalten zur Zugkraftentwicklung. Abb. 4.13 stellt beispielhaft die Bruchdehnungsentwicklung über die Breite der Schweißprobe unter verschiedenen großen Bewegungsamplituden bei einer Frequenz von 0,25 Hz dar. Deutlich zu erkennen ist der dramatische Abfall der Bruchdehnung mit zunehmender Bewegungsamplitude. Im Gegensatz zur Zugfestigkeit verhält sich die Bruchdehnung über die Probenbreite nahezu konstant. Auftretende Schwankungen und Einbrüche liegen im Rahmen der Versuchtoleranz. Ausreißer, wie beispielhaft im Verlauf der Bruchdehnung für eine Bewegungsamplitude von $\pm 0,1$ mm zu erkennen, waren in der Regel durch das Einbringen von Kerben bei Herausarbeiten der Zugproben aus den Schweißproben begründet. Ein Anstieg der Bruchdehnung mit Zunahme der Entfernung vom Startpunkt der Schweißung konnte nicht festgestellt werden. Einzige Ausnahme bildet der Bruchdehnungsverlauf für eine Bewegungsamplitude von $\pm 0,8$ mm. Hier zeigt sich im Startbereich der Schweißung ein Rückgang der Bruchdehnung auf Null. Dieser Sachverhalt resultierte aus dem Bruch der Zugprobe vor dem Einbau in die Zugprüfmaschine. Der

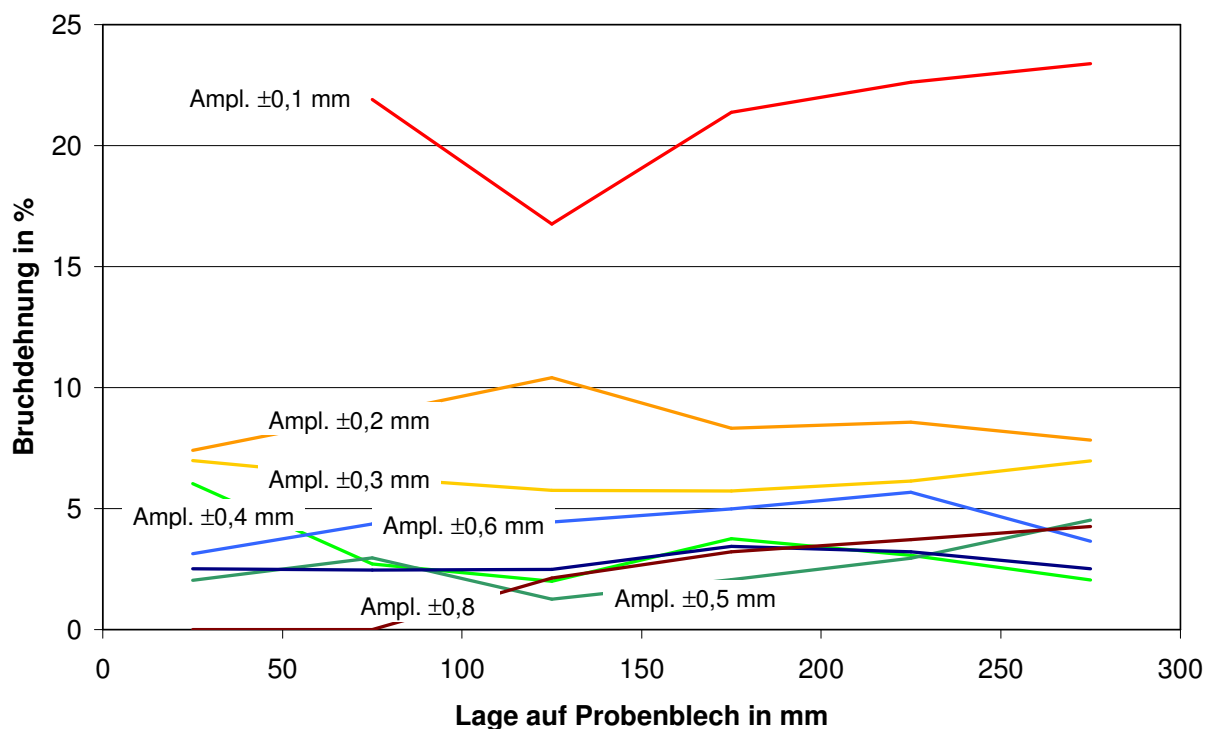


Abb. 4.13 Bruchdehnung über die Schweißprobenbreite bei einer Frequenz von 0,25 Hz

sich darstellende Bruch hatte seine Ursache in einem durchgehenden Nahtmittenriss, welcher sich bereits während des Schweißversuches einstellte.

Das beschriebene frequenz- und amplitudenabhängige Verhalten der Schweißproben spiegelt sich in den aufgenommenen Kraft-Weg-Verläufen der untersuchten Zugproben wieder. Die in den Abb. 4.14 und 4.15 dargestellten Kraft-Weg-Verläufe weisen eine ausgeprägte Abhängigkeit von der, während des Schweißprozesses einwirkenden, Bewegungsamplitude auf. Sämtlichen dargestellten Kraftverläufen liegt eine Bewegungsfrequenz von 0,75 Hz zugrunde. Deutlich erkennbar ist der kontinuierliche Abfall der Bruchdehnung mit steigender Bewegungsamplitude. Bereits kleinste Änderungen der Bewegungsamplitude führen zu einem signifikanten Duktilitätseinbruch, zu erkennen am Rückgang der Bruchdehnung bei einer Amplitudensteigerung von $\pm 0,1$ mm auf $\pm 0,2$ mm. Das Verhalten der Zugproben wird mit Steigerung der Bewegungsamplitude zunehmend spröder. Ein offensichtliches Einschnüren der Zugprobe ist ausschließlich im Zugkraftverlauf der unter einer Bewegungsamplitude von $\pm 0,1$ mm abgeschweißten Probe zu erkennen. Besonders hervorzuheben ist der einheitliche Entwicklungsverlauf der gemessenen Zugkräfte im Bereich der Bewegungsamplitude bis $\pm 0,4$ mm sowie das plötzliche Versagen ohne Brucheinschnürung, vgl. 4.14. Die im Bereich der Schweißnaht gemessenen lokalen Kraft-Weg-Verläufe der Abb. 4.15 zeigen auf den ersten Blick ein analoges Verhalten zur Darstellung der Abb. 4.14. Mit zunehmender Bewegungsamplitude kommt es zum Rückgang der im Zugversuch ermittelten Höchstkraft. Eine genauere Betrachtung zeigt, dass es nach dem Durchfahren der Hookschen Geraden zu einer Aufteilung der einzelnen lokalen Kraft-Weg-Verläufe kommt. Dieses Verhalten deutet auf den unterschiedlichen Schädigungsgrad der Schweißnähte infolge Rissbildung hin. Des Weiteren weisen die vorhandenen Kraft-Weg-Verläufe nur eine geringe Bereitschaft zur Ausbildung eines Fließplateaus auf, was in den werkstofflichen Eigenschaften des Schweißgutes begründet liegt. Einzelne Zacken im Kraftverlauf deuten auf das Erreichen der Fließgrenze, der nicht mit dem Schweißzusatzwerkstoff aufgemischten Nahtrandbereiche hin (WEZ), welche sich innerhalb des Messbereiches des Extensometers befanden. Im Gegensatz zum globalen Kraft-Weg-Diagramm kommt es nach dem Durchschreiten der Höchstkraft zu einem Kräfteabfall. Im Zuge des Abfalls zeigen sich Einbrüche, die auf ein lokales Aufreißen von Anrissen hindeuten, vgl. Abb. 4.15. Eine Aussage hinsichtlich des lokalen Verhaltens der Schweißnaht bis zum Bruch ist anhand der lokalen Kraft-Weg-Diagramme nicht möglich, da das Extensometer bei einer lokalen Verformung von knapp 1,0 mm entfernt wurde. Durch das vorzeitige Entfernen sollten Schäden am Extensometer durch plötzliches Versagen der Zugprobe vermieden werden.

Neben der Bewegungsamplitude führt eine Variation der Bewegungsfrequenz zu Unterschieden im Kraft-Wegverlauf der Zugproben. Abb. 4.16 und 4.17 stellen exemplarisch die Kraftentwicklung im Zugversuch für Schweißproben dar, die unter verschiedenen Frequenzen, jedoch einheitlich mit einer Bewegungsamplitude von $\pm 0,1$ mm verschweißt worden sind. Analog zur Bewegungsamplitude führt eine Steigerung der Bewegungsfrequenz zu einer Abnahme der Bruchdehnung im Zugversuch sowie zum

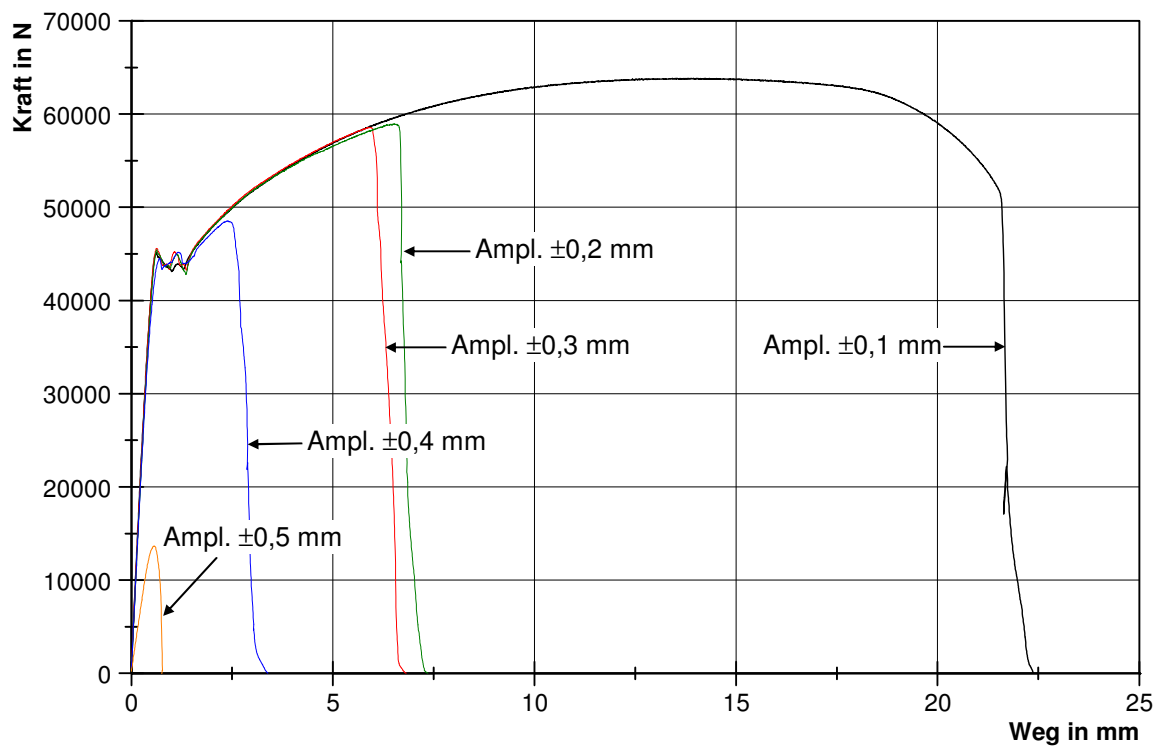


Abb. 4.14 Kraft-Weg-Diagramme für Zugproben T3, Frequenz 0,75 Hz

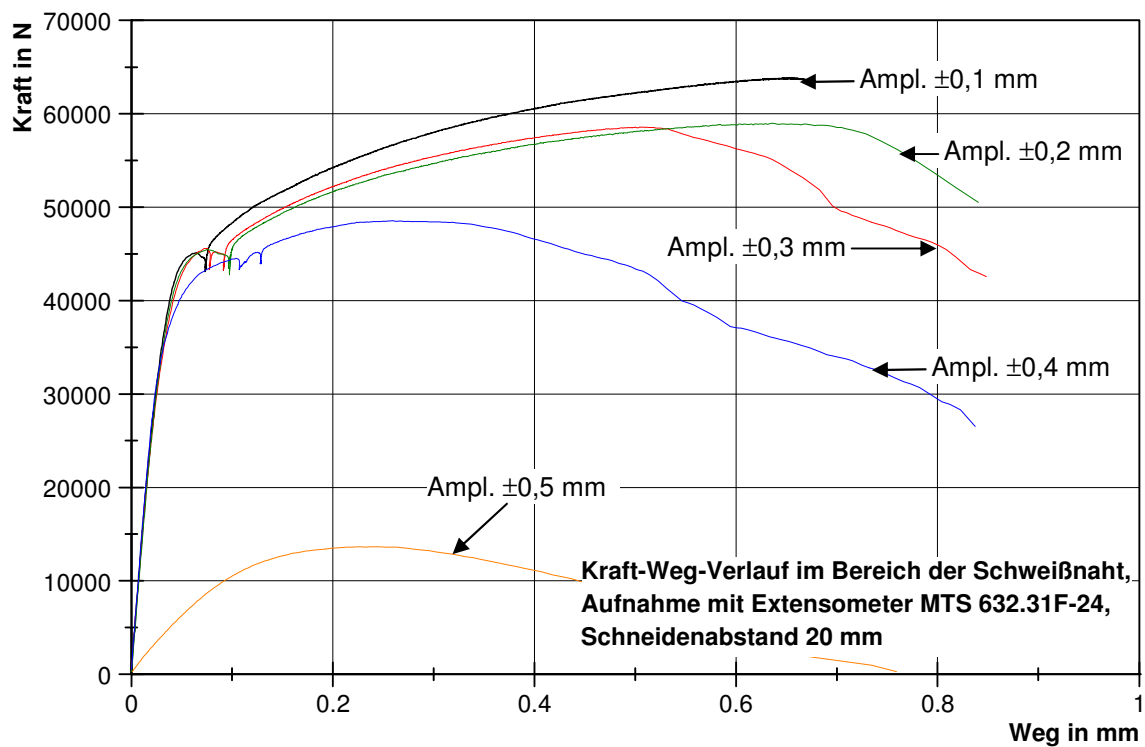
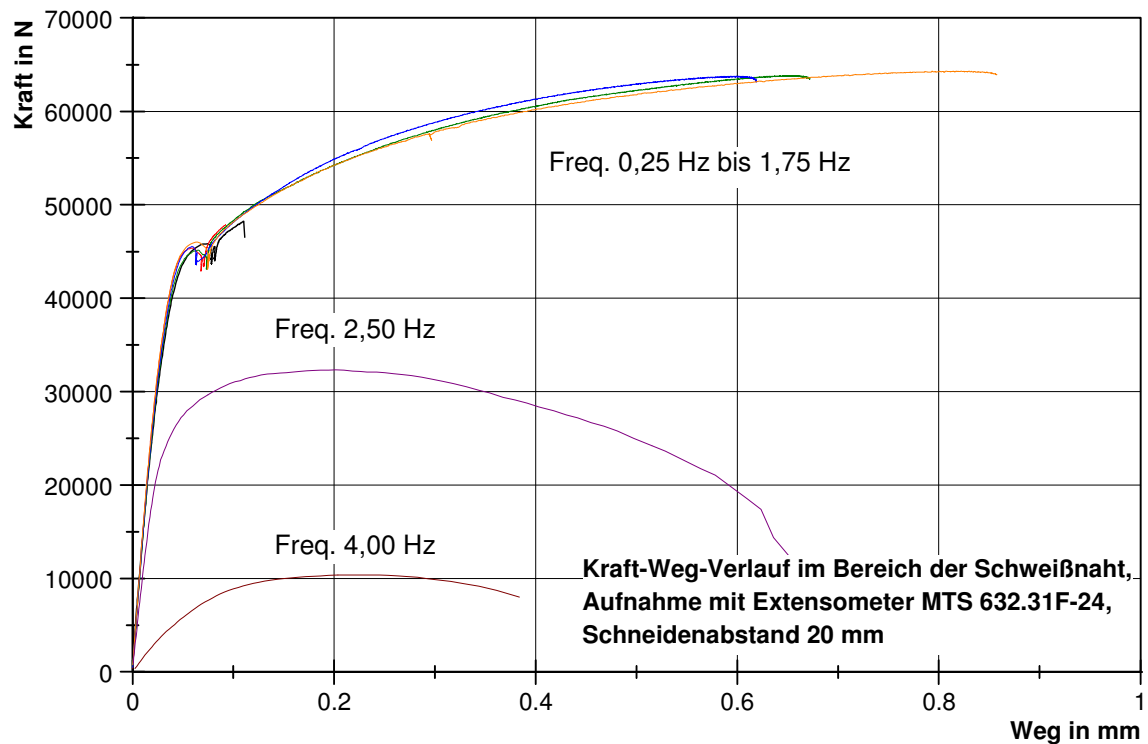
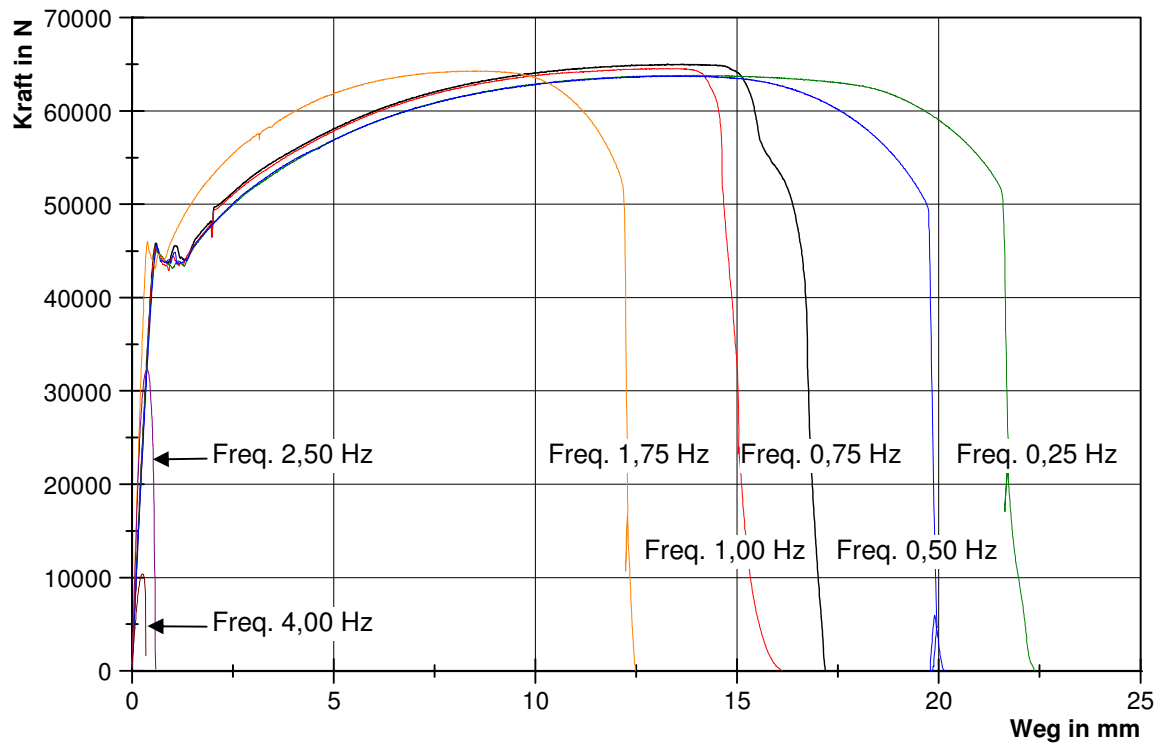


Abb. 4.15 Lokale Kraft-Weg-Diagramme im Schweißnahtbereich, Proben T3, Frequenz 0,75 Hz



Rückgang der Brucheinschnürung, vgl. Abb. 4.16. Das sich darstellende Versagensbild geht mit steigender Bewegungsfrequenz in ein zunehmend sprödebruchähnliches Verhalten über. Kennzeichnend für diesen Sachverhalt ist der im Kraft-Weg-Diagramm mit zunehmender Frequenz stärker abfallende Kräfteverlauf nach dem Erreichen der Höchstzugkraft. Nahezu unbeeinflusst vom Rückgang der Bruchdehnung ist, bis zu einer Frequenz von 1,75 Hz, die Art des Kraftverlaufs sowie Höhe der im Zugversuch erreichten Höchstzugkraft. Die in Abb. 4.16 dargestellten Kraft-Weg-Diagramme weisen bis zum Erreichen ihrer Höchstzugkraft identische Verläufe auf. Es ist jedoch hervorzuheben, dass diese Aussage nur für einen kleinen Bereich der Untersuchung Gültigkeit besitzt. Ein Vergleich der Verhältnisse in Abb. 4.10 und Abb. 4.16 verdeutlicht, dass die These der Konstanz der Höchstzugkraft über die Frequenz offensichtlich nur im Bereich einer maximalen Bewegungsamplitude von $\pm 0,3$ mm und bis zu einer Frequenz von 1,0 bis 1,75 Hz gilt. Entsprechend den gemachten Ausführungen stellt sich das lokale Verformungsverhalten während des Zugversuches im Bereich der Schweißnaht dar. Die in Abb. 4.17 dargestellten Kraft-Weg-Verläufe zeigen im Vergleich zu den globalen Kraft-Weg-Beziehungen der Abb. 4.16 ein nahezu identisches Verhalten. Ausnahme bildet analog zu Abb. 4.15 das quasi nicht Vorhandensein eines Fließplateaus, was in der Zusammensetzung des Nahtmaterials begründet liegt.

Grundsätzlich zeigen die vorgestellten Untersuchungsergebnisse, dass es durch die Bewegung der Nahtflanken beim Verschweißen von Bauteilen zu einer Versprödung der Schweißverbindung infolge Rissbildung kommt. Bereits kleinste Bewegungen führen zu signifikanten Einbußen hinsichtlich der Duktilität der Verbindung. Hauptgrund für das spröde Verhalten der Verbindung ist das Vorliegen von Rissen in der Schweißnahtmitte. Als problematisch ist anzusehen, dass die im Schweißgut vorhandenen Risse, beim Vorliegen kleiner Bewegungsamplituden, keine Verbindung zur Nahtoberfläche aufweisen, so dass eine Detektion mit einfachsten Methoden (Farbeindringverfahren) nicht möglich ist, vgl. Kapitel 3.2.3.1. Aufgrund der Nahtschädigungen infolge der Rissbildung stellte sich im Zugversuch ein Versagen der Verbindung fast ausschließlich in der geschädigten Schweißnahtmitte ein. Die sich im Verlauf der Zugversuche ergebenden Bruchformen sind in Abhängigkeit von der Bewegungsamplitude und Frequenz in Abb. 4.18 dargestellt. Eine genaue Betrachtung der Bruchflächen zeigt, dass die Anzahl der Risse pro Zentimeter Schweißnaht sowie die Rissform und Größe mit der Bewegungsamplitude bzw. Frequenz korrelieren. Mit größer werdender Bewegungsamplitude kommt es zu einer Vergrößerung der Rissfläche. Eine Änderung der Rissform tritt bei einer Beibehaltung der Bewegungsfrequenz nicht ein. Der Riss entwickelt sich ausgehend von der Schweißnahtwurzel in Richtung der Nahtoberfläche. In Abhängigkeit der aufgetragenen Größe der Bewegungsamplitude wachsen die Risse bis zur Oberfläche der Schweißnaht. Wird die Bewegungsfrequenz erhöht, steigt in gleichen Maßen die Anzahl der Risse pro Zentimeter Schweißnaht. Gleichzeitig ändert sich die Form der Rissausbildung. Im unteren Frequenzbereich von 0,25 Hz weisen die Risse eine tropfenförmige Gestalt auf. Ausgehend von der Nahtwurzel verjüngt sich der Riss zur Schweißnahtoberfläche, wobei die Rissspitze entgegen der Schweißrichtung orientiert ist. Steigt die Bewegungsfrequenz an, so nehmen die entstehenden Risse die Form

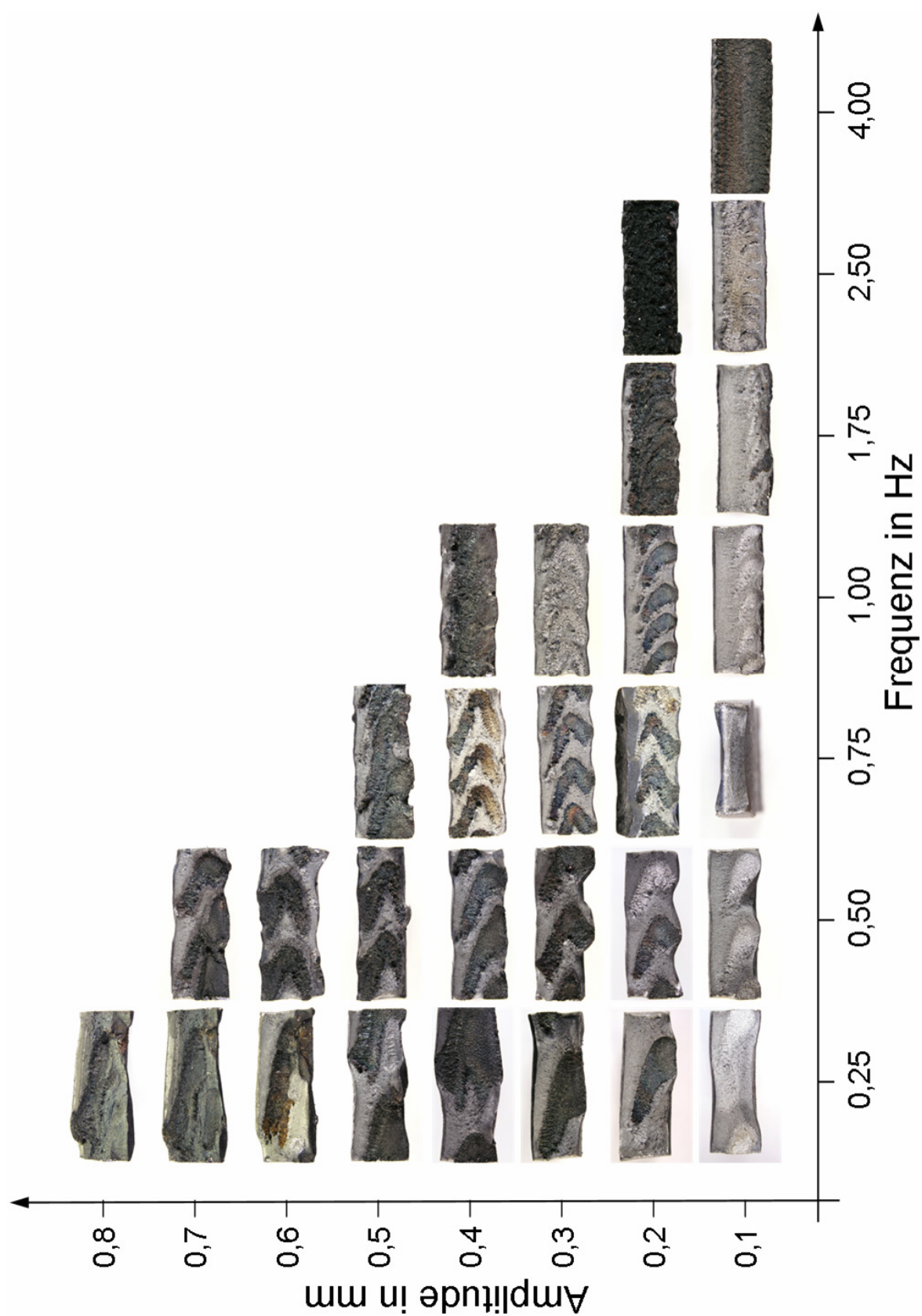


Abb. 4.18 Übersicht der Bruchflächen der Zugproben in Abhängigkeit der Bewegungsamplitude und Frequenz

eines „Bumerangs“ an, dessen Spitze in die Schweißrichtung zeigt. Eine weitere Steigerung der Bewegungsfrequenz über 0,75 Hz hinaus bewirkt eine erneute tropfenförmige Ausbildung der Risse. Mit dem Erreichen einer Bewegungsfrequenz von mehr als 1,75 Hz kommt es zu einer Verbindung der Einzelrisse. Die Bruchflächen weisen eine reliefartige Struktur auf, einzelne Rissstrukturen gehen verloren. Letztlich kommt es zum Bruch in der Schweißnahtmitte während der Schweißung. Ein Verbinden der Blechproben ist nicht mehr möglich. Unter den zugrunde liegenden Versuchsbedingungen lag die Grenzfrequenz bei 7,0 Hz.

Eine genauere Betrachtung der Rissflanken bzw. der Rissoberflächen zeigt, dass diese in Abhängigkeit der Bewegungsamplitude unterschiedlich ausgeprägt sind. Bis zu einer Amplitude von $\pm 0,1$ mm weisen die Rissoberflächen keine Anzeichen von Oxidation auf, erkennbar an der hellen Bruchstruktur. Mit der Steigerung der Bewegungsamplitude kommt es zur Oxidbildung auf den Rissflanken. Im Bruchbild erscheinen die oxidierten Rissoberflächen dunkel. Es lässt sich schlussfolgern, dass die in der Zugphase des Versuches entstehenden Risse, ab einer Bewegungsamplitude von $\pm 0,20$ mm, eine wurzelseitige Verbindung zur Oberfläche aufweisen. Unter Zugbeanspruchung klaffen die Risse auf, Sauerstoff aus der Umgebungsatmosphäre wird in den Risspalt gesogen. Die noch glühendheiße metallische Oberfläche der Rissflanken begünstigt die chemische Reaktion zwischen Metall und Sauerstoff. Es kommt zur Oxidbildung. Im Zuge der anschließenden Druckphase werden die Rissflanken aufeinander gepresst. Ein Verschweißen der Risse infolge des vorherrschenden Druckes und Wärme ist aufgrund der vorhandenen Oxidschichten ausgeschlossen. Es kommt somit zu einer bleibenden Schädigung der Schweißnaht, was sich im Rückgang der gemessenen Bruchdehnungen widerspiegelt. Liegt eine Bewegungsamplitude von $\pm 0,1$ mm oder kleiner vor, reißen die entstehenden Risse nicht bis zur Wurzeloberfläche auf. Eine Oxidation bleibt aus, was dazu führt, dass die Rissflanken sich in der Druckphase zumindest in Teilen verbinden können. Dieser Umstand zeigt sich auch in den wesentlich höheren Bruchdehnungen der Zugproben. Es lässt sich somit schlussfolgern, dass eine Vermeidung der Rissflankenoxidation, z.B. durch einen Wurzelschutz mittels Schutzgas oder Badsicherung, zu einer Verbesserung der Duktilität führt.

4.3.4 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der durchgeführten Zugversuche zeigen, dass ein Verschweißen von Bauteilen unter Betriebsbeanspruchungen eingeschränkt möglich ist. In Abhängigkeit von der Bewegungsamplitude und Frequenz kommt es durch Rissbildung zu einer Schädigung der Schweißverbindung. Bruchdehnung und Zugfestigkeit der Zugproben weisen eine enge Korrelation zur vorliegenden Beanspruchung während des Schweißprozesses auf. Eine Steigerung der Bewegungsfrequenz als auch eine Erhöhung der Bewegungsamplitude führt zu einem Rückgang der Tragfähigkeit und Duktilität der Schweißverbindung, vgl. Abb. 4.10 und 4.12. Als besonders empfindlich reagiert die Bruchdehnung auf die Vergrößerung der Bewegungsamplitude. Bereits kleinste Erhö-

hung der Amplitude führen zu einem überproportionalen Rückgang der Bruchdehnung. Ursächlich hierfür scheint die Oberflächenbeschaffenheit der Rissflanken zu sein.

4.4 Tragfähigkeitsuntersuchung der Schweißproben mit Eigenbadsicherung

4.4.1 Versuchsdurchführung, Probenform und Herstellung

Zur Beurteilung der Schweißnahtqualität der im Kapitel 3.3 vorgestellten Schweißversuche mit Eigenbadsicherung (6 mm V-förmige Kerbe) wurden Zugversuche an den hergestellten Schweißproben durchgeführt und mit den Ergebnissen von in Ruhe geschweißten Proben verglichen. Die Durchführung der Zugversuche erfolgte in Anlehnung an die DIN 10002. Der Versuchsaufbau entsprach den Ausführungen des Kapitels 4.2.

Um eine einwandfreie Herstellung der Flachzugproben hinsichtlich Geometrie und Lage des Entnahmepunktes im Schweißversuchskörper zu garantieren, erfolgte die Probenentnahme mittels CNC-gesteuerter Fräsung. Abb. 4.19 zeigt die den Zugversuchen zugrunde liegende Probenform. Zur Bestimmung des Verhaltens der Schweißnahtgüte über die Länge der Schweißnaht wurden je Schweißprobekörper 4 Zugproben mit einem Achsabstand von 50 mm entnommen, vgl. Abb. 4.20. Die Probenbezeichnung orientiert sich am Startpunkt der Schweißung und beginnt mit „T1“. Nach dem Vermessen der Zugproben erfolgte das Anbringen von Rissmarken zur späteren Bestimmung der Bruchdehnung. Analog zum Vorgehen des Kapitels 4.3 wurden die lokalen Verformungen der Zugproben im Bereich der Schweißnaht mittels eines Extensometers erfasst. Um einen sicheren Sitz des Extensometers auf der Zugprobe zu gewährleisten, war es erforderlich, vorhandene Walzrückstände und Verschmutzungen zu entfernen. Die Reinigung der Probenoberfläche erfolgte durch vorsichtiges Bürsten, so daß das Einbringen von Kerben in die Zugprobe sicher ausgeschlossen werden konnte.

Nach dem Abschluss der Probenpräparation erfolgte der Probeneinbau in die Prüfmaschine und die Durchführung des Zugversuches. Sämtliche Zugversuche wurden in reiner Wegregelung durchgeführt. Die den Zugversuchen zugrunde liegenden Verfahrgeschwindigkeiten des Prüfzylinders orientierten sich an den Angaben der DIN 10002. Im Bereich der elastischen Verformung betrug die Verfahrgeschwindigkeit des

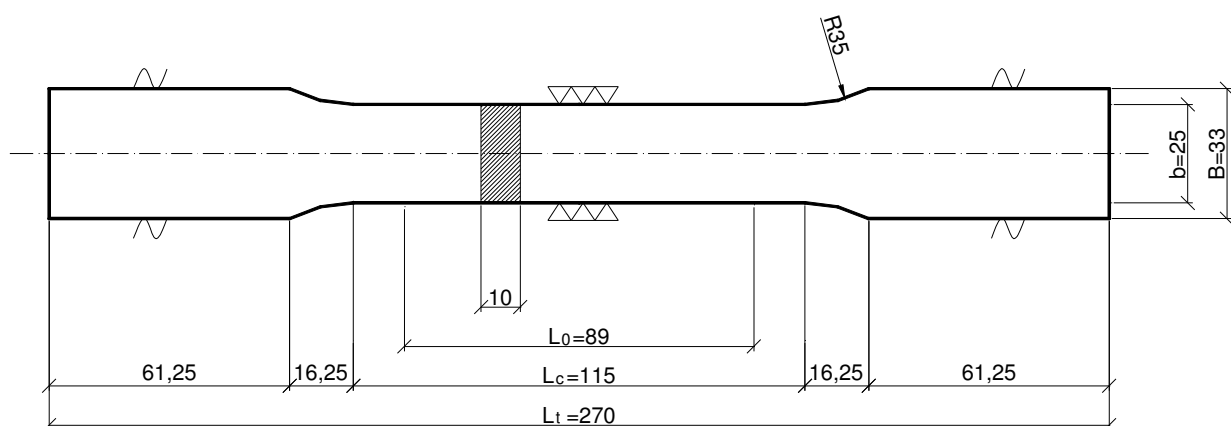


Abb. 4.19 Probengeometrie Flachzugprobe $t=10$ mm

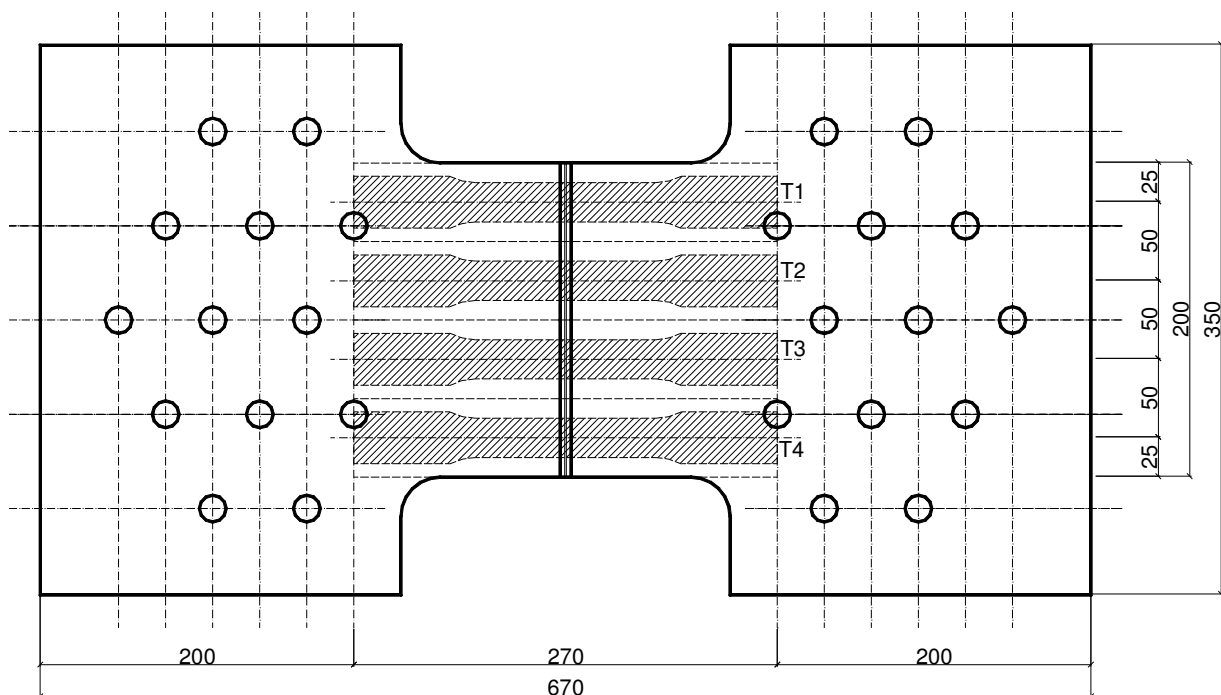


Abb. 4.20 Anordnung der Zugproben im Probenblech der Schweißversuche $t=10$ mm

Prüfzylinders 1,2 mm/min und wurde im Bereich der plastischen Probenverformung auf 12 mm/min gesteigert. Zur Gewährleistung, dass ein schlagartiges Probenversagen keine Schäden an den Prüfmitteln (Extensometer) verursacht, wurde nach einer lokalen Verformung von 1 mm, der Zugversuch angehalten und das Extensometer entfernt.

4.4.2 Zugversuche an Referenzschweißungen in Ruhe

Analog zu den Bemerkungen des Kapitels 4.3.2 dienen die durchgeführten Zugversuche an Referenzschweißungen in Ruhe zur Beurteilung der Auswirkungen der Betriebsbeanspruchung während des Schweißprozesses auf die sich darstellende Schweißnahtgüte. Insgesamt wurden 3 Referenzschweißungen durchgeführt, aus denen je 4 Zugversuchsproben gewonnen wurden. Das Verhalten der Proben im Zugversuch ist exemplarisch für eine Zugprobe der Lage „T3“ (vgl. Abb. 4.20) in den Kraft-Weg-Diagrammen der Abb. 4.21 und 4.22 dargestellt. Der sich darstellende Kraft-Weg-Verlauf weist die für einen Baustahl typischen Charakteristika auf. Deutlich zu erkennen ist der elastische Bereich der Hookschen Geraden, das ausgeprägte Fließplateau sowie die Absenkung der Kraft im Bereich der Brucheinschnürung nach dem Durchschreiten der Höchstzugkraft. Das Versagen der Schweißverbindungen trat bei allen Proben im Grundwerkstoff auf und kündigte sich durch eine Einschnürung der Probe an. Vergleicht man die lokalen Kraft-Weg-Diagramme der 6 mm (Abb. 4.6) und 10 mm (Abb. 4.22) starken Schweißproben, so weist der Kraftverlauf für die 10 mm Probe ein ausgeprägteres Fließplateau auf. Dies lässt sich dadurch erklären, dass infolge der Nahtvorbereitung

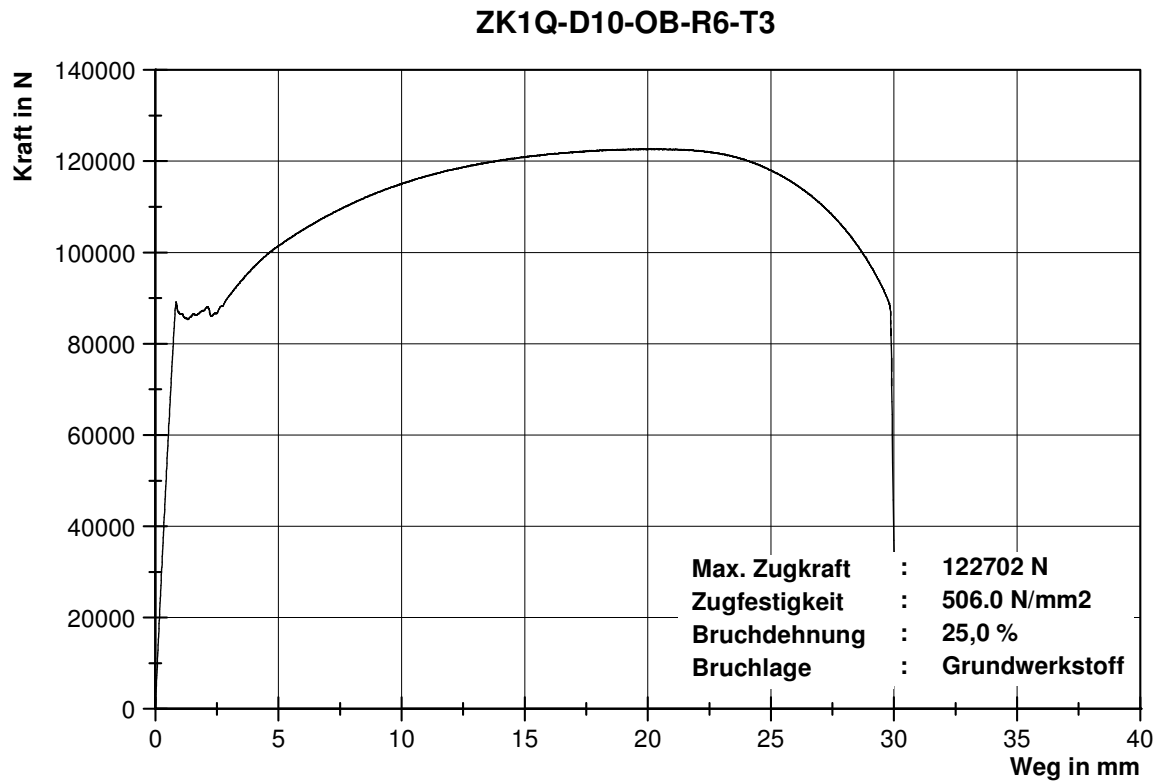


Abb. 4.21 Kraft-Weg-Diagramm für eine Schweißung in Ruhe, Blechstärke 10 mm, S355 J2 G3

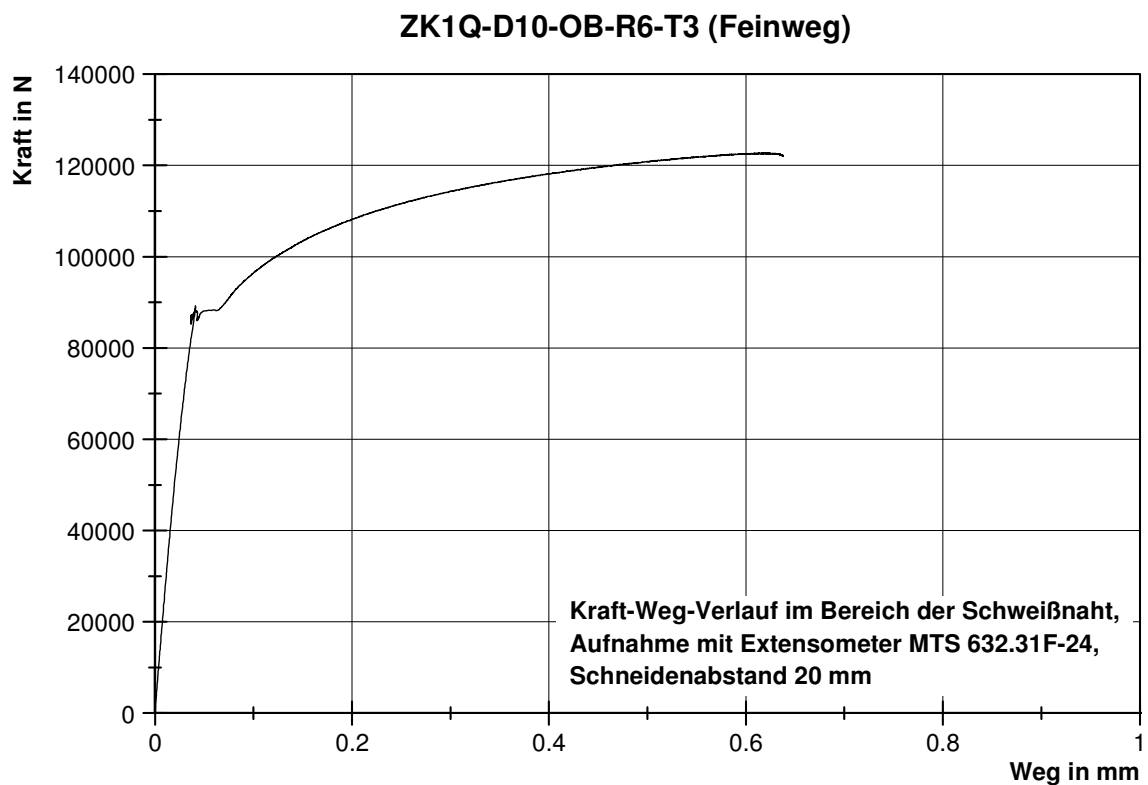


Abb. 4.22 Lokales Kraft-Weg-Diagramm im Bereich der Schweißnaht, Blechstärke 10 mm

ung sowie des vorhandenen Restquerschnittes, größere Probenbereich keine Aufmischung durch den Schweißzusatzwerkstoff beim Schweißen erfahren haben.

Zur Beschreibung der Schweißnahtqualität über die Schweißnahtlänge und zur Ermöglichung eines direkten Vergleiches der drei Referenzschweißungen wurden die sich aus den Zugversuchen ergebenden Kennwerte bestimmt und miteinander verglichen. Der Verlauf der Höchstzugkraft weist über die Schweißnahtlänge keine signifikante Streuung auf, vgl. Abb. 4.23. Ein Vergleich mit den Kraftverläufen der Abb. 4.7 zeigt, dass das Vorhandensein eines Restquerschnittes, aufgrund der größeren Homogenität des Querschnittes, zu einer Reduktion der Streuung führt. Aus den Ergebnissen der Zugversuche errechnet sich der Mittelwert der Zugfestigkeit über die drei Referenzschweißungen zu 123068 N. Werden die gemessenen Höchstzugkräfte auf den jeweiligen Probenquerschnitt bezogen, ergibt sich der in Abb. 4.24 dargestellte Verlauf der Zugfestigkeiten über die Schweißprobenquerschnitte. Der Verlauf weist aufgrund der nahezu gleichen Querschnittsflächen der einzelnen Zugproben eine qualitativ identische Charakteristik im direkten Vergleich zur Höchstzugkraft auf. Die mittlere Zugfestigkeit wurde zu 506 N/mm^2 bestimmt. Dieser Wert liegt damit knapp 1% unterhalb der Normgrenze für einen S355J2G3 gemäß DIN 10025. Analog zur Zugfestigkeit, weisen die Bruchdehnungsverläufe weder Schwankungen noch „Ausreißer“ auf. Die durchschnittliche Bruchdehnung ergab sich über alle Zugversuche zu 26,56%.

Aus den dargestellten Kraft- und Bruchdehnungsverläufen ist erkennbar, dass die ausgeführten Schweißungen eine hohe Qualität hinsichtlich der Ergebnisstreuung aufweisen und damit als Referenz verwendet werden können. Der Schweißnahtanteil von nur rd. 60% an der Gesamtquerschnittsfläche der untersuchten Proben scheint mit ur-

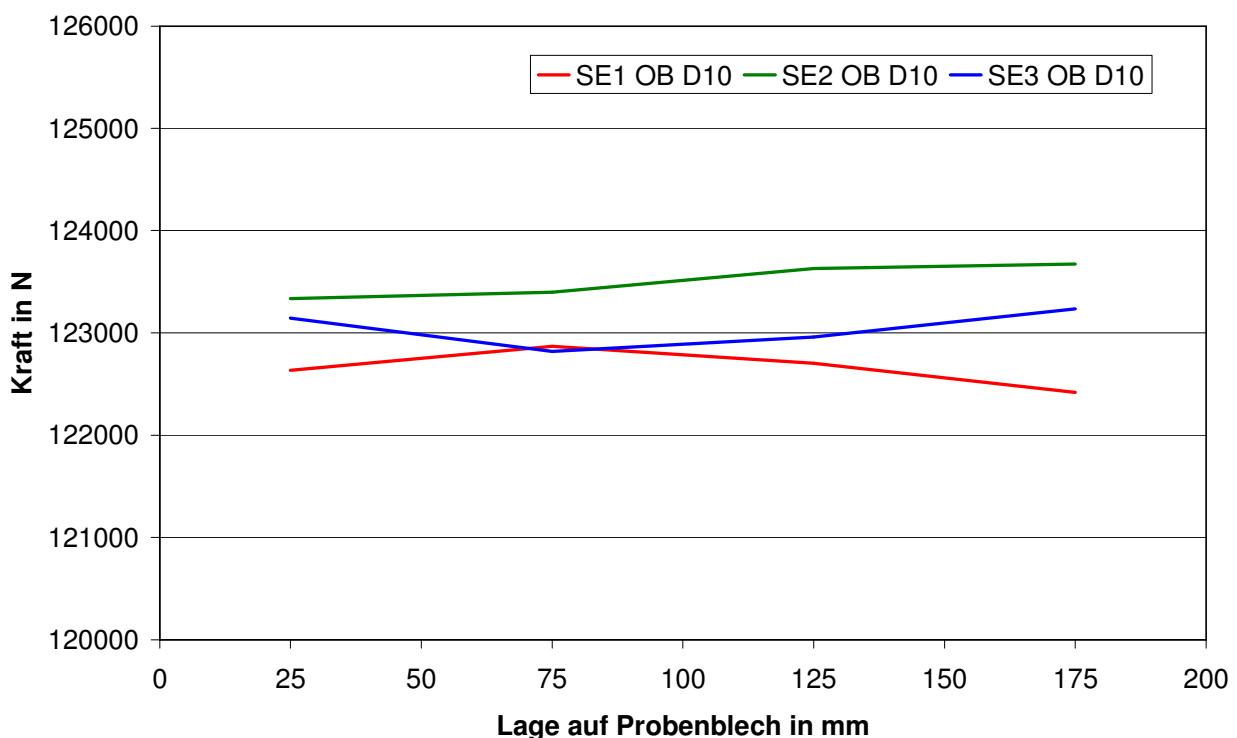


Abb. 4.23 Entwicklung der Höchstzugkraft über die Schweißprobenbreite, Blechstärke 10 mm

sächlich für die geringe Streubreite der Ergebniswerte zu sein. Zusätzlich trägt die Automatisierung der Versuchsdurchführung zur Gleichmäßigkeit der Nahteigenschaften über die Länge der Schweißnaht bei, bei einer Handschweißung wäre eine größere Streubreite zu erwarten ist.

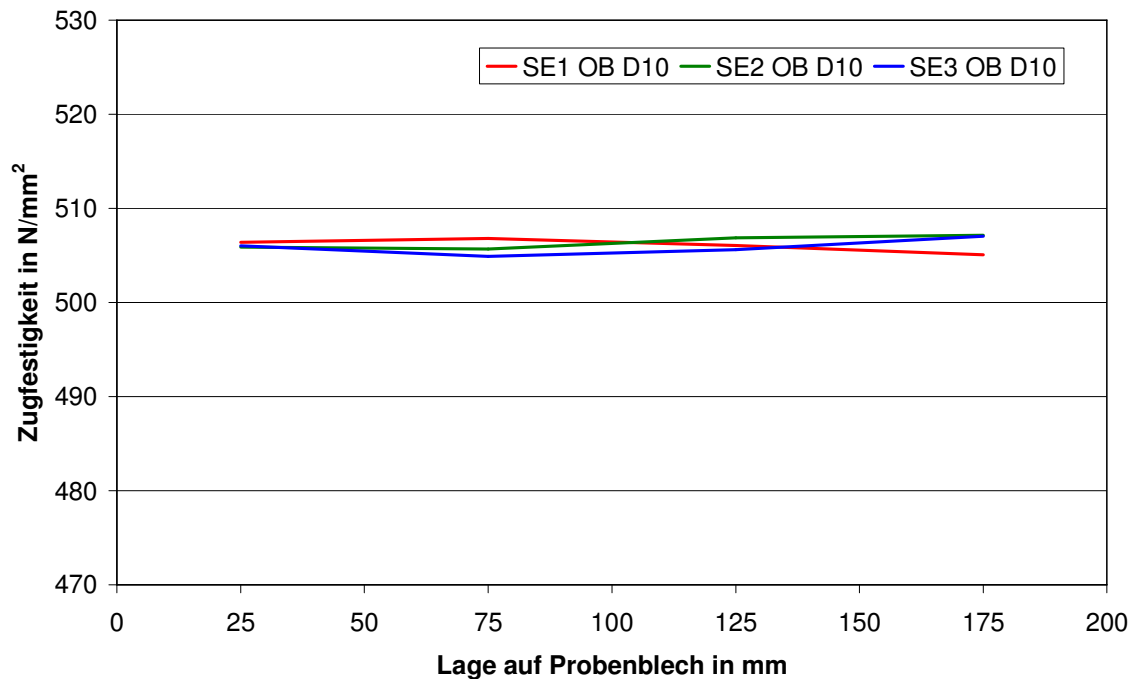


Abb. 4.24 Entwicklung der Zugfestigkeit über die Schweißprobenbreite, Blechstärke 10 mm

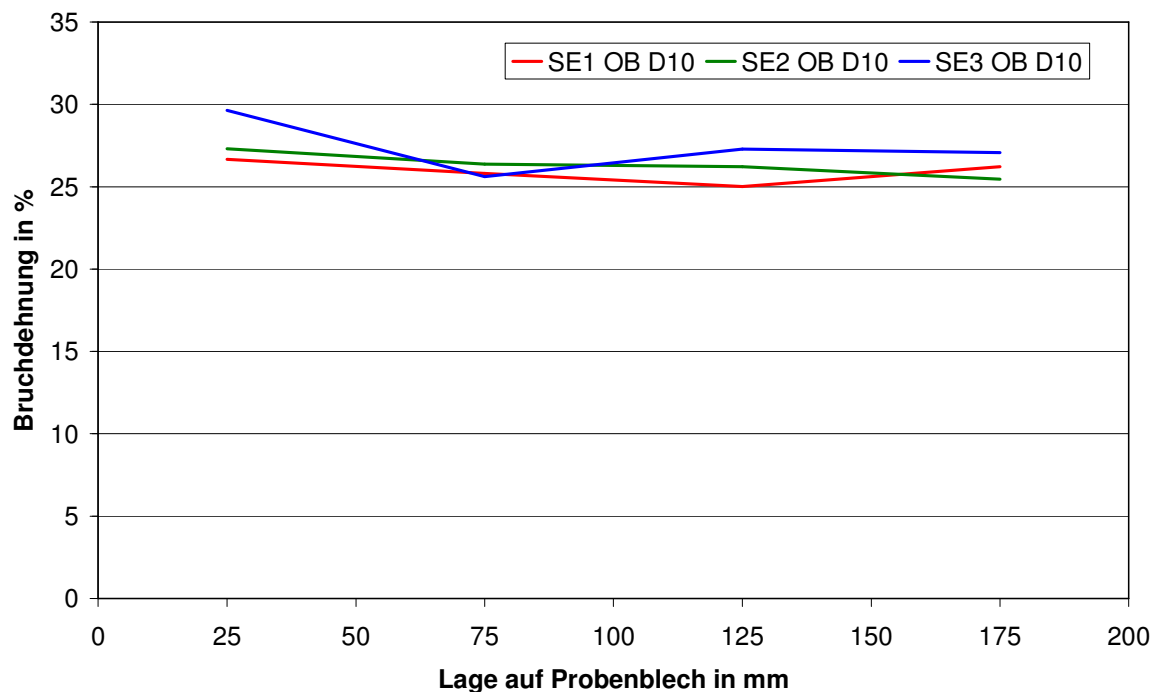


Abb. 4.25 Entwicklung der Bruchdehnung über die Schweißprobenbreite, Blechstärke 10 mm

4.4.3 Zugversuche an Schweißproben mit Eigenbadsicherung

Analog zu den Schweißversuchen mit anfänglicher Bauteiltrennung kommt es bei den Schweißproben mit Badsicherung infolge der Nahtflankenbewegungen während des Schweißprozesses zu einer Schädigung der Schweißnähte. Wie die im Kapitel 3.3.3.1 vorgestellten Untersuchungen erkennen lassen, weisen die hergestellten Schweißnähte eine frequenz- und amplitudenabhängige Nahtschädigung durch Rissbildung auf. Um einen Eindruck über die Streugröße der Nahteigenschaften zu bekommen, wurde im Gegensatz zu den Versuchen des Kapitels 3.2 die Parametervielfalt eingeschränkt und die Anzahl der Schweißversuche pro Parametersatz erhöht, vgl. Tab 3.4. Die aus den Schweißversuchen gewonnenen Zugproben (4 Stück pro Schweißprobe) wurden mit Zugproben aus Schweißproben verglichen, die während der Schweißung keiner Nahtflankenbewegung ausgesetzt waren. Das Ergebnis der durchgeführten Zugversuche bildete die Grundlage für die anschließende statistische Untersuchung. Tab. 4.1 zeigt die Tragfähigkeit der untersuchten Schweißnähte in Abhängigkeit von der Bewegungsamplitude bzw. Frequenz. Die Tabelle enthält Angaben zur mittleren Höchstzugkraft aller Zugproben unter den jeweiligen Randparametern, die Verhältniszahl im Bezug auf die Referenzschweißung in Ruhe sowie die sich ergebende Standardabweichung. Eine genauere Betrachtung lässt erkennen, dass ein Abfall der Höchstzugkraft im Zugversuch, beim Vorliegen einer Bewegungsamplitude von $\pm 0,20$ mm und einer Frequenz bis 2,0 Hz im Schweißversuch, quasi nicht stattfindet. Der Anstieg der Streuung ist minimal, deutet jedoch auf eine größere Unsicherheit der Ergebnisse mit steigender Frequenz hin. Analog zu den Untersuchungen an Schweißproben mit anfänglicher Probentrennung kommt es mit größer werdender Bewegungsamplitude zu einem Abfall der erreichten Höchstzugkräfte. Dieser Abfall erweist sich jedoch als verhältnismäßig moderat. Unter einer Amplitude von $\pm 0,80$ mm und einer Bewegungsfrequenz von 0,25 Hz

Tab. 4.1 Mittelwerte der Höchstzugkräfte, Verhältnis Bewegung/Ruhe, Standardabweichung

		Frequenz in Hz							
		0,00		0,25		1,00		2,00	
Amplitude in mm	±0,00	123068,25 ¹⁾							
		1,00 ²⁾	399,29 ³⁾						
	±0,20			123120,42		123471,58		123505,33	
				1,00	350,80	1,00	553,39	1,00	578,75
	±0,50			123507,25		121834,75			
				1,00	407,41	0,99	2627,63		
	±0,80			106987,08					
				0,87	6118,46				

¹⁾ Mittlere Höchstzugkraft in N

²⁾ Verhältnis Höchstzugkraft Bewegung/Ruhe

³⁾ Standardabweichung in N

beträgt der Abfall der Höchstzugkraft nur rd. 23%. Unter denselben Randparametern kommt es bei einer Schweißung ohne Eigenbadsicherung zu einem Absinken der Höchstzugkraft um rd. 80%. Es ist daher von einem positiven Effekt der Badsicherung für die Schweißverbindung auszugehen. Inwieweit die Badsicherung und damit der Probenrestquerschnitt zur Kraftübertragung beitragen, lässt sich nicht abschließend klären. Es muss jedoch davon ausgegangen werden, dass der vorhandene Restquerschnitt die Nahtflankenbewegungen beim Schweißprozess einschränkt, was zu günstigeren Verhältnissen gegenüber den Schweißungen bei anfänglicher Probentrennung führt. Zusätzlich verhindert die Badsicherung einen Zutritt der Atmosphäre zum wurzelseitigen Nahtanriss. Eine Oxidation der Rissflanken wird somit erschwert, was ein teilweises Verschweißen der Rissflanken während der Druckphase ermöglicht. Die Streuung der Nahtqualität nimmt mit der Steigerung der Bewegungsamplitude überproportional zu. Wie aus der Tab. 4.1 beispielhaft ersichtlich, führt die Vergrößerung der Bewegungsamplitude von $\pm 0,2$ mm auf $\pm 0,8$ mm zu einer siebzehnfachen Erhöhung der Standardabweichung.

Das Verhalten der Höchstzugkräfte über die Schweißprobenbreite ist bis zu einer Schweißbewegungsamplitude von $\pm 0,5$ mm als gleichmäßig zu bezeichnen. Abhängigkeiten bestehen bis zu einer Frequenz von 2,0 Hz nicht. Abb. 4.26 stellt exemplarisch den Verlauf der im Zugversuch bestimmten Höchstzugkräfte über die Schweißprobenbreite für eine Bewegungsfrequenz von 0,25 Hz dar. Deutlich erkennbar ist das enge Streuband im Amplitudenbereich bis $\pm 0,5$ mm. Schwankungen zwischen den einzelnen Versuchen sind als normale Versuchstoleranzen zu bezeichnen. Mit Steigerung der Bewegungsamplitude auf $\pm 0,8$ mm kommt es zum Abfall der erreichten Höchstzugkräf-

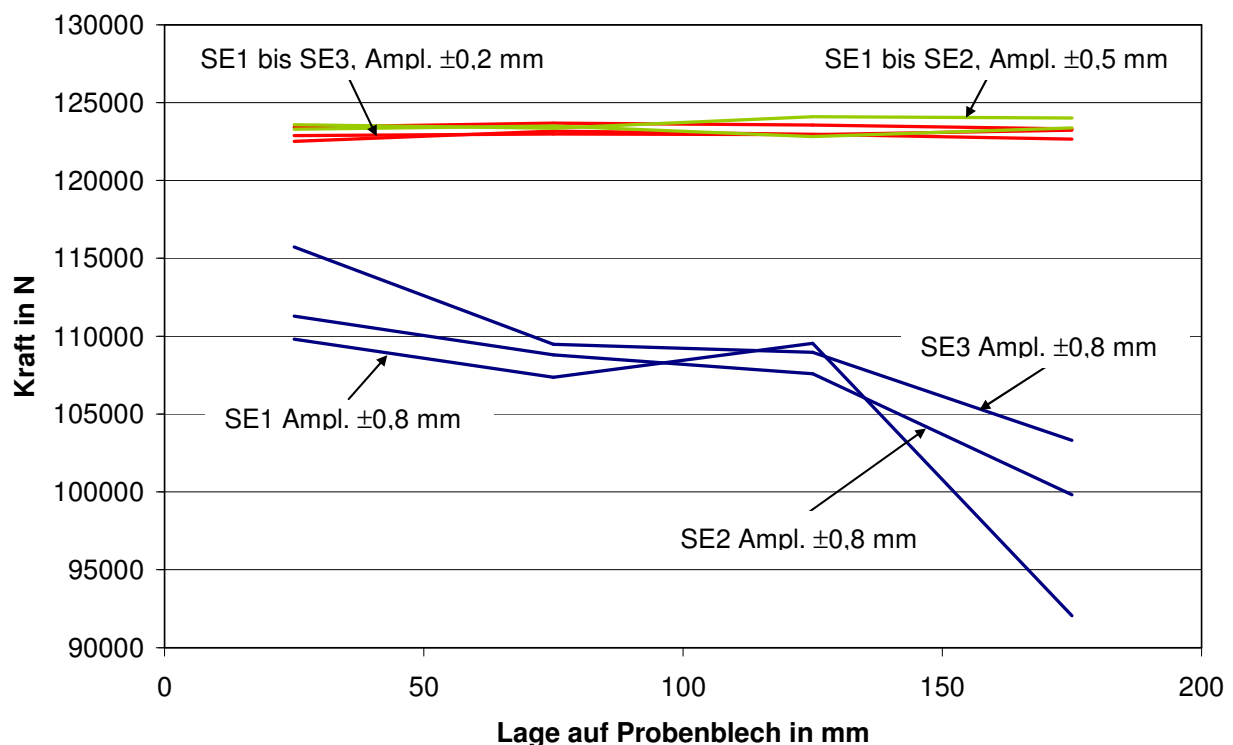


Abb. 4.26 Höchstzugkraft über die Schweißprobenbreite für eine Frequenz von 0,25 Hz, Blechstärke $t=10$ mm

te. Zusätzlich zeigt sich ein kontinuierlicher Kräfteabfall über die Schweißprobe, welcher für alle drei Schweißversuche und Zugversuchsserien nahezu identisch ist. Dieser Kräfteabfall lässt sich aus der Probengeometrie und Art begründen. Zu Beginn der Schweißung weist die Probe im späteren Nahtbereich eine Verbindung auf (Restquerschnitt). Dieser überträgt eine gewisse Kraft infolge der Lagerschlittenbewegungen. Die Schweißprobe wird auf der gesamten Probenlänge gedehnt, was zu einer Differenz zwischen Nahtflankenbewegung und aufgebrachter Bewegungsamplitude führt. Mit fortschreitendem Schweißprozess wird die Versuchskörpermitte erwärmt, der E-Modul sinkt. Es kommt zu einer bevorzugten Dehnung des Probenmaterials im Bereich der Schweißnaht. Dieses „Aufweichen“ führt zu erhöhter lokaler Dehnung und damit größeren Bewegungen der Schweißnahtflanken, in Abhängigkeit des Schweißfortschrittes. Die tatsächlich auftretenden Nahtflankenbewegungen sind gegen Schweißende am größten, so dass das eingebrachte und erstarrende Schweißgut stärker beansprucht wird als zu Beginn der Schweißung. Diese Beanspruchung führt zu einem Abfall der Zugfestigkeit über die Schweißnahtlänge. Zusätzlich wird das Schweißgut soweit geschädigt, dass das Versagen der Zugprobe in der Schweißnahtmitte erfolgt. Analog zum beschriebenen Probenverhalten kommt es im Bereich der Bewegungsamplitude kleiner gleich $\pm 0,50$ mm zu einer Schweißnahtschädigung. Diese kann jedoch durch das höherfeste Schweißgut kompensiert werden. Ein Abfall im Höchstzugkraftverlauf über die Probenbreite tritt nicht auf, das Probenversagen erfolgt im Grundwerkstoff.

Das Bruchdehnungsverhalten weist gegenüber den Zugversuchen der Schweißproben mit anfänglicher Probentrennung ein duktileres Verhalten auf. Wie aus der Tab. 4.2 ersichtlich, besteht eine Korrelation zwischen Bewegungsamplitude, Frequenz und Bruchdehnung. Eine Steigerung der Bewegungsamplitude führt, ebenso wie die Erhöhung der Bewegungsfrequenz, zu einem Rückgang der Bruchdehnung im Zugversuch. Im Gegensatz zu den Schweißversuchen mit anfänglicher Probentrennung tritt der Ab-

Tab. 4.2 Mittelwerte der Bruchdehnung, Verhältnis Bewegung/Ruhe, Standardabweichung

		Frequenz in Hz							
		0,00		0,25		1,00		2,00	
Amplitude in mm	±0,00	26,56 ¹⁾							
		1,00 ²⁾	1,21 ³⁾						
	±0,20			27,30		26,23		26,85	
				1,03	1,41	0,99	1,18	1,01	1,20
	±0,50			26,27		18,71			
				0,99	0,85	0,70	7,71		
	±0,80			6,38					
				0,24	1,48				

¹⁾ Mittlere Bruchdehnung

²⁾ Verhältnis Bruchdehnung Bewegung/Ruhe

³⁾ Standardabweichung

fall der Duktilität nicht einheitlich bei einer Bewegungsamplitude von $\pm 0,20$ mm auf, vgl. Abb. 4.12. Das Auftreten des verstärkten Rückgangs der Bruchdehnung weist eine ausgeprägtere Affinität zur Bewegungsfrequenz während des Schweißprozesses auf. Eine Steigerung der Bewegungsfrequenz im Schweißversuch führt zu einem früheren Einsetzen des Duktilitätsabfalls im Zugversuch. Liegt das Einsetzen des Duktilitätsabfalls im Zugversuch für eine Schweißprobe der Frequenz 0,25 Hz im Amplitudenbereich von $\pm 0,5$ bis $\pm 0,80$ mm, so kommt es durch eine Frequenzvervierfachung zu einem früheren Einsetzen des Rückgangs der Bruchdehnung im Amplitudenbereich von $\pm 0,25$ bis $\pm 0,50$ mm.

Die Streuung der Bruchdehnung weist hinsichtlich der Bewegungsamplitude und Frequenz keine Analogie zur Zugkraft auf. Eine Erhöhung der Standardabweichung mit der Frequenz oder Amplitude ist nicht erkennbar. Größere Abweichung ergeben sich für die Schweißversuche unter einer Bewegungsamplitude von $\pm 0,5$ mm. Dies mag in dem Umstand begründet liegen, dass für diese Amplitude je Parametersatz nur zwei Schweißversuche durchgeführt worden, wodurch die Grundgesamtheit auf je 8 Zugversuche beschränkt ist.

Abb. 4.27 zeigt die Bruchdehnungsentwicklung über die Schweißprobenbreite, beispielhaft für eine Bewegungsfrequenz von 0,25 Hz. Deutlich zu erkennen ist die geringe Streubreite der Werte. Es ist auffällig, dass die Bruchdehnungsverläufe sich bis zu Bewegungsamplitude von $\pm 0,50$ mm nicht signifikant unterscheiden. Dies lässt sich dadurch erklären, dass ein Versagen der Zugproben im Grundwerkstoff auftrat. Die Tragfähigkeit der Schweißnaht lag trotz vorhandener Nahtschädigungen über der Festigkeit des Grundmaterials. Im Gegensatz zum Verlauf der Höchstzugkräfte weisen die Bruch-

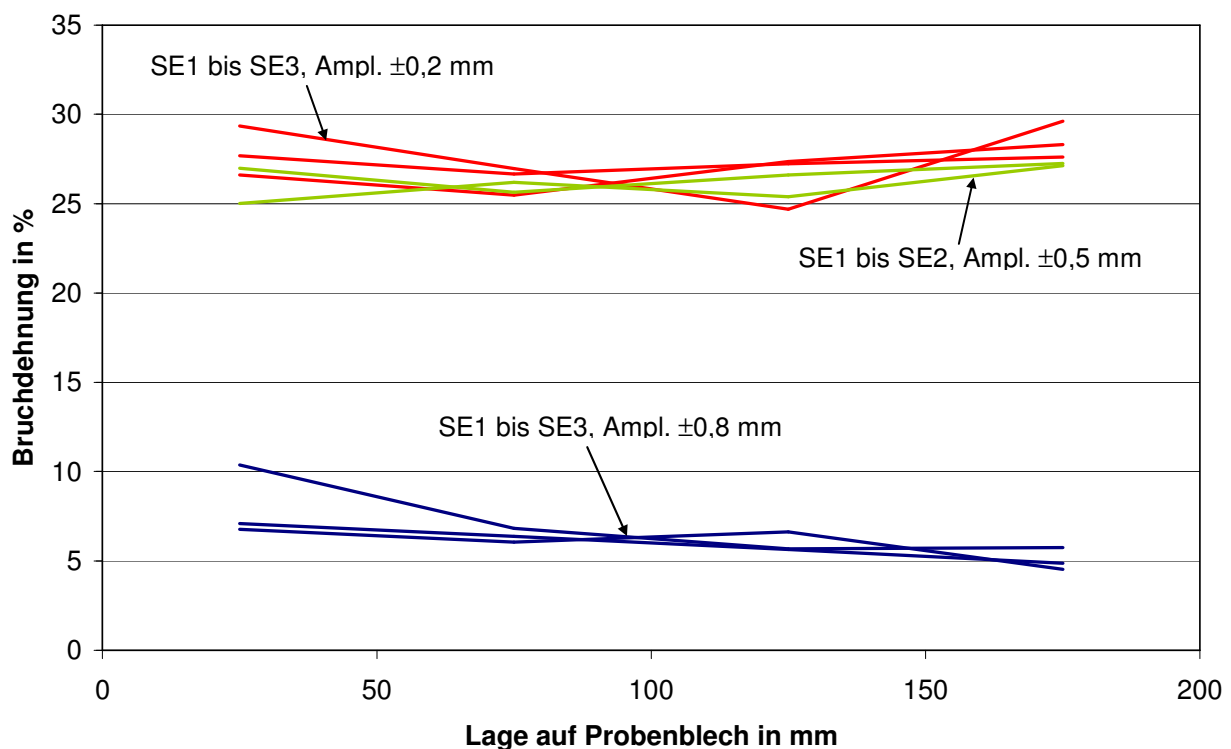


Abb. 4.27 Bruchdehnung über die Schweißprobenbreite bei einer Frequenz von 0,25 Hz, Blechstärke $t=10$ mm

dehnungsverläufe der, unter eine Bewegungsamplitude von $\pm 0,80$ mm hergestellten Schweißproben, einen nahezu konstanten Verlauf über die Probenbreite auf. Ein übermäßiger Rückgang der Bruchdehnung zum Schweißende ist nicht erkennbar.

Die Auswirkungen der Nahtflankenbewegungen während des Schweißprozesses auf die Schweißnahtgüte zeigen sich in einem direkten Vergleich der sich aus den Zugversuchen ergebenden Kraft-Weg-Beziehungen, beispielhaft für verschiedene Bewegungsamplituden in Abb. 4.28 und 4.29 dargestellt. Den abgebildeten Kraft-Weg-Verläufen liegt eine Bewegungsfrequenz von 0,25 Hz zugrunde. Die sich darstellenden Kraft-Weg-Verläufe weisen für die Zugproben der Bewegungsamplituden bis $\pm 0,50$ mm den „klassischen“ Verlauf für einen Baustahl auf. Auffällig ist der gravierende Rückgang der Duktilität ab einer Bewegungsamplitude von $\pm 0,50$ mm. Das klassische Einschnürverhalten der Zugprobe im Zugversuch ist nur bis zu einer Amplitude von $\pm 0,50$ mm erkennbar. Sämtliche Zugproben der Bewegungsamplituden $\pm 0,20$ mm und $\pm 0,50$ mm versagten im Grundwerkstoff. Im Gegensatz zu den Kraft-Weg-Verläufen der Schweißversuche mit anfänglicher Probentrennung (Abb. 4.14) ist die Streuung im Kraft-Weg-Verhalten mit dem Vorhandensein einer Badsicherung deutlich geringer. Eine Betrachtung der lokalen Kraft-Weg-Verläufe im Bereich der Schweißnaht zeigt geringfügige Unterschiede der Verläufe auf, analog dem Gesamtverhalten der Zugproben in Abb. 4.28. Der Kraft-Weg-Verlauf für die Zugprobe der Bewegungsamplitude $\pm 0,80$ mm lässt ein frühzeitiges Abflachen im Bereich der Verfestigung erkennen. Das Fließplateau weist einen ebeneren Verlauf auf. Die typische Kraftspitze zu Beginn des Fließplateaus fehlt. Nach dem Überschreiten der Höchstzugkraft kommt es zu einem Kraftabfall. Eine genauere Betrachtung der Bruchflächen der Zugprobe zeigt eine sehr lokal begrenzte Einschnürung im Bereich der Schweißnahtmitte.

Eine Variation der Bewegungsfrequenz führt im Bereich kleiner Bewegungsamplituden nur zu geringen Unterschieden im Kraft-Weg-Verlauf der untersuchten Zugproben. Abb. 4.30 und 4.31 stellen die Kraft-Weg-Verläufe der Zugproben aus Schweißproben mit unterschiedlichen Bewegungsfrequenzen, jedoch einer einheitlichen Bewegungsamplitude von $\pm 0,2$ mm während des Schweißprozesses dar. Analog zu dem Probenverhalten mit unterschiedlicher Bewegungsamplitude bewirkt eine Steigerung der Bewegungsfrequenz einen Rückgang der Duktilität, vgl. Abb. 4.30. Dieser stellt sich jedoch bis zu einer Frequenz von 2,0 Hz als nicht ausgeprägt dar und kann als minimal bezeichnet werden. Mit Blick auf Tab. 4.2 ist festzustellen, dass die Steigerung der Bewegungsfrequenz eine Auswirkung auf das Einsetzen des Duktilitätsabfalls in Abhängigkeit der Bewegungsamplitude hat. Es kann postuliert werden, dass eine Steigerung der Bewegungsfrequenz zu einem früheren Einsetzen des Duktilitätsabfalls bei kleineren Bewegungsamplitude führt. Im Gegensatz zu dem globalen Verhalten der Zugproben weisen die lokalen Kraft-Weg-Verläufe im Bereich der Schweißnaht keine frequenzabhängigen Unterschiede auf, vgl. Abb. 4.31. Die Kraft-Weg-Diagramme zeigen bis zum Ende der Messaufzeichnung nahezu identische Verläufe. Das lokale Probenverhalten ist analog zu den Kraft-Weg-Verläufen der Zugproben aus den Schweißproben mit anfänglicher Probentrennung, vgl. Abb. 4.17.

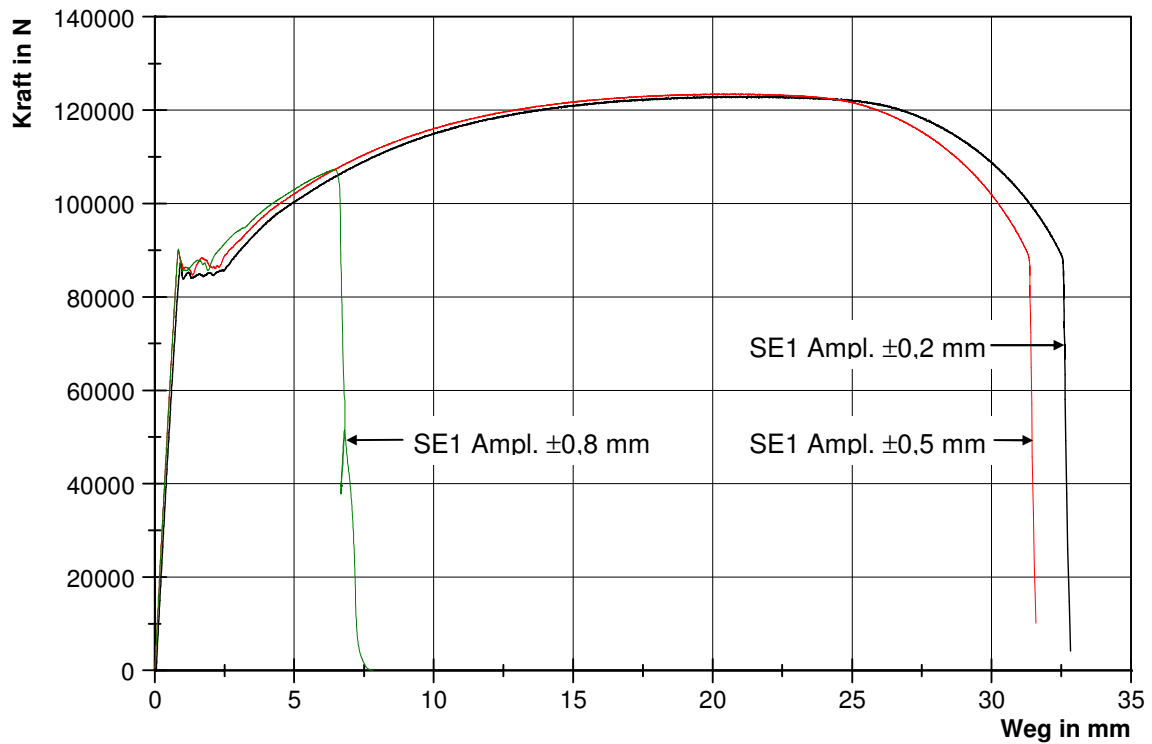


Abb. 4.28 Kraft-Weg-Diagramme für Zugproben T2, Frequenz 0,25 Hz, Blechstärke $t=10$ mm

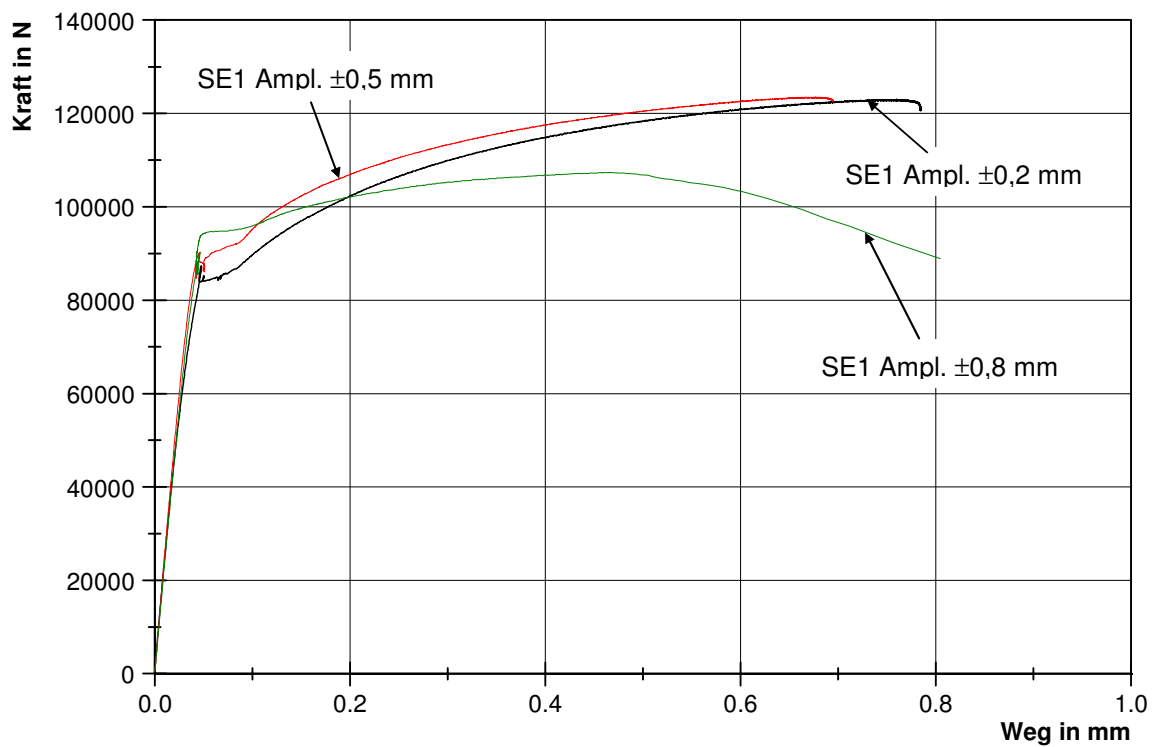


Abb. 4.29 Lokale Kraft-Weg-Diagramme im Schweißnahtbereich, Proben T2, Frequenz 0,25 Hz

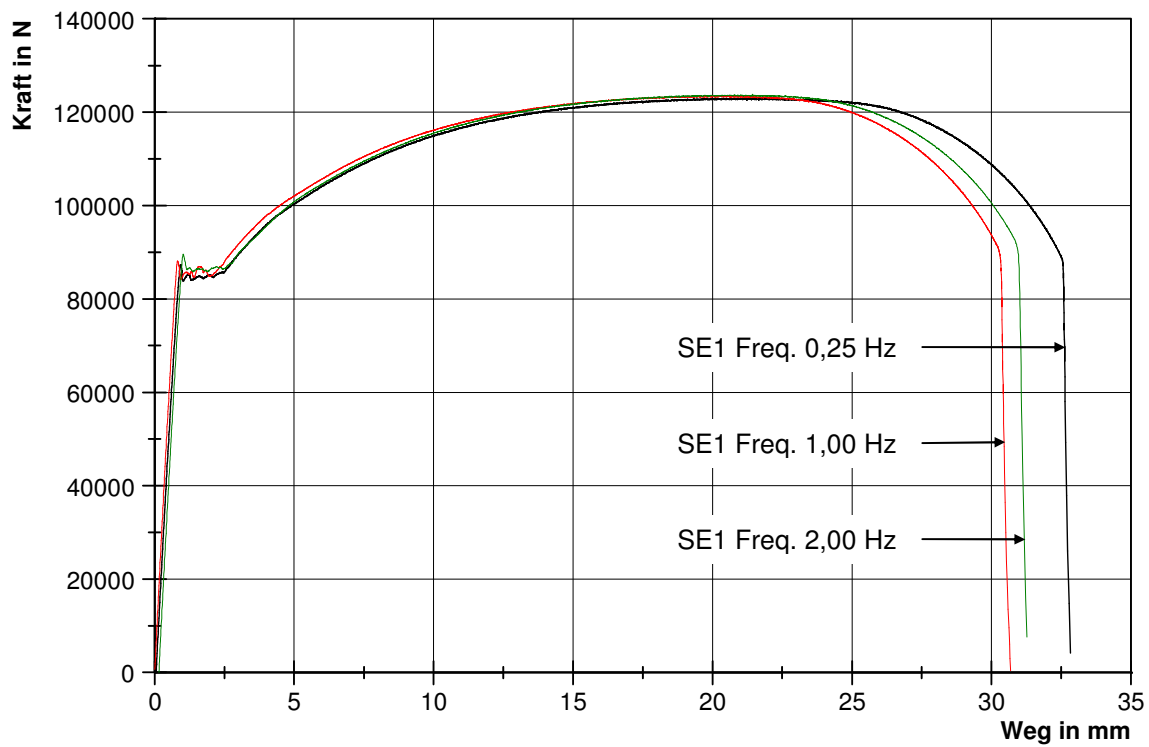


Abb. 4.30 Kraft-Weg-Diagramme für Zugproben T2, Amplitude $\pm 0,2$ mm, Blechstärke $t=10$ mm

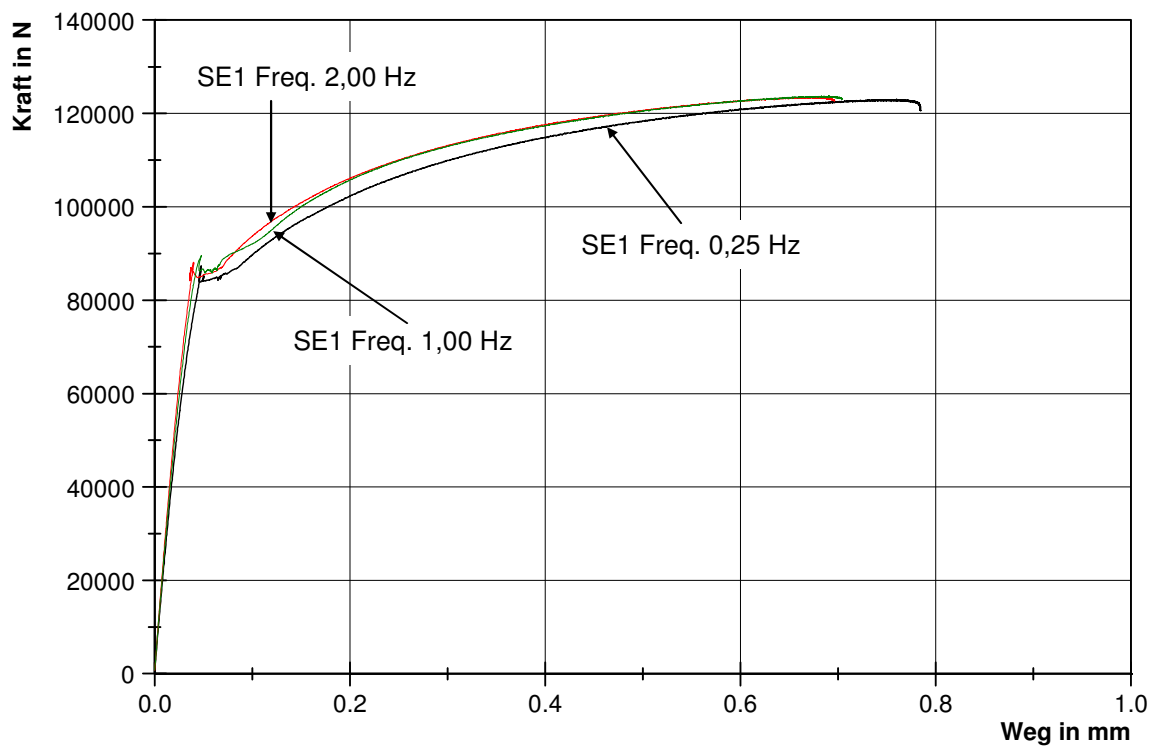


Abb. 4.31 Lokale Kraft-Weg-Diagramme im Schweißnahtbereich, Proben T2, Amplitude $\pm 0,20$ mm

Wie erläutert, liegt die Ursache für den Duktilitätsverlust der untersuchten Schweißverbindungen in der Schädigung der Schweißnaht durch die, während der Schweißung, wirkende Wechselbeanspruchung aus Zug und Druck. Eine Betrachtung der sich im Zugversuch darstellenden Bruchflächen zeigt, dass die Schädigung der Schweißnaht durch Risse in der Nahtmitte verursacht wird. Die sich darstellende Rissgeometrie zeigt eindeutige Abhängigkeiten von der im Schweißversuch vorherrschenden Bewegungsamplitude und Frequenz. Wie aus den Abb. 4.32 und Abb. 4.33 zu erkennen, führt eine größere Bewegungsamplitude zu einem Anwachsen der Rissgröße. Eine Steigerung der Bewegungsfrequenz bewirkt eine Erhöhung der Rissanzahl pro Zentimeter Schweißnahtlänge. Grundsätzlich lassen sich zwei Rissarten unterscheiden. Im Falle nicht zu großer Bewegungsamplituden wächst der Riss, ausgehend von der Schweißnahtwurzel, in das Schweißgut hinein, erreicht jedoch nicht die Schweißnahtoberfläche. Eine Verbindung mit der umgebenden Atmosphäre besteht nicht, die Rissflanken sind metallisch blank und weisen keine Oxidation auf. Wird die Bewegungsamplitude vergrößert, stellt sich ein ausgeprägteres Risswachstum ein. Die Rissspitze erreicht ab einer bestimmten Amplitude die Schweißnahtoberfläche. Mit der Verbindung zur Nahtoberfläche besteht ein Zugang zur umgebenden Atmosphäre, was zu einer Oxidation der Rissflanken führt, vgl. Abb. 4.32. Durch die vorhandene Oxidschicht auf den Rissflanken ist ein Verschweißen der Anrisse während der Druckphase im Schweißversuch nicht möglich. Die Oxidschicht wirkt trennend und verhindert einen direkten Kontakt der Rissflanken miteinander. Im Gegensatz hierzu kommt es beim Vorliegen der metallisch blanken Rissflanken zu einem teilweisen Verschweißen der Risse. Wie aus der Abb. 4.33 zu erkennen, weisen die Risse in ihrer Längsrichtung eine Unterbrechung auf. Diese Unterbrechung kennzeichnet den Bereich der teilweisen Verschweißung.

Ein Vergleich zwischen den Bruchstrukturen der Schweißproben mit anfänglicher Probentrennung und den Schweißproben mit Badsicherung zeigt, dass der Ort der ersten Oberflächendurchdringung des Risses unterschiedlich ist. Während die Risse der Schweißproben mit anfänglicher Probentrennung den Zugang zur Umgebungsatmosphäre zuerst im Wurzelbereich erreichen, ist dies für die Schweißproben mit Badsicherung im Bereich der Nahtoberfläche der Fall. Aufgrund des Ausgangspunktes der Rissentwicklung in der Nahtwurzel weisen die Risse der Schweißproben mit anfänglicher Probentrennung bereits bei kleineren Bewegungsamplituden eine Verbindung zur Umgebungsatmosphäre auf. Es lässt sich schlussfolgern, dass der genannte Sachverhalt



Abb. 4.32 Bruchbild Zugprobe, Amplitude 0,80 mm, Frequenz 0,25 Hz, Blechstärke $t=10$ mm



Abb. 4.33 Bruchbild Zugprobe, Amplitude 0,50 mm, Frequenz 1,00 Hz, Blechstärke $t=10$ mm

ursächlich für das günstigere Duktilitätsverhalten der Schweißproben mit Badsicherung ist, da die vorhandene Badsicherung auftretende Risse gegen die Umgebungsatmosphäre abschirmt.

Die Ausbildung der Schweißnahtwurzel ist für die Beurteilung der Schweißnahtgüte ein entscheidendes Kriterium. Wie aus den dargestellten Bruchbildern ersichtlich, ist das sichere Erfassen der Schweißnahtwurzel mit der vorherrschenden Bewegungsfrequenz korreliert. Ein Vergleich der dargestellten Bruchbilder zeigt, dass die Anzahl der nicht erfassten Wurzelabschnitte mit der Steigerung der Frequenz zunimmt, wobei die Länge der einzelnen nicht erfassten Wurzelabschnitte sinkt. Ausgangspunkt dieser Betrachtung bildet die einwandfreie Wurzelerfassung der Schweißversuche in Ruhe. Erreicht die Bewegungsfrequenz einen kritischen Wert, so gehen die nicht erfassten Wurzelabschnitte ineinander über, eine sichere Erfassung der Wurzel ist nicht mehr gegeben, vgl. Abb. 4.33. Eine genaue Ursache für dieses Verhalten konnte nicht gefunden werden. Es scheint jedoch möglich, dass die Nahtflankenbewegungen den Schweißlichtbogen ablenken, so dass dieser den Wurzelgrund nicht sicher aufschmelzen kann. Zusätzlich verursacht die Bewegung der Nahtflanken eine pulsationsartige Kontraktion des Schmelzbades, was zu einem Einschluss von Gas unterhalb der Schmelze führen kann. Grundsätzlich bleibt festzustellen, dass eine Erhöhung der Bewegungsamplitude und Frequenz zu einer Verschlechterung der Wurzelerfassung führt.

4.4.4 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Die vorgestellten Versuchsergebnisse belegen, dass das Verschweißen eines ausgefugten Risses unter äußerer Beanspruchung möglich ist. Negative Auswirkungen durch die Nahtflankenbewegung während des Schweißprozesses auf die Schweißnahtqualität werden durch das Vorhandensein einer Badsicherung gemildert. Die Duktilität der Schweißproben mit Badsicherung ist, gegenüber den Schweißproben mit anfänglicher Probentrennung, signifikant höher. Im Schweißgut vorhandene Risse können im gewissen Umfang durch die höhere Festigkeit des Schweißgutes kompensiert werden, so dass es innerhalb gewisser Grenzen zu einem frequenz- und amplitudenabhängigen Versagen der Zugproben im Grundwerkstoff kommt. Den Schwachpunkt der Schweißverbindungen bilden die Risse in der Schweißnahtmitte. Ein Abfall der Bruchdehnung tritt mit der Rissöffnung zur Nahtoberfläche auf. Das sichere Erfassen der Schweißnahtwurzel wird durch die Größe der Bewegungsamplitude und Frequenz beeinflusst.

Kapitel 5

Metallurgische Untersuchungen

5.1 Allgemeine Grundlagen und Vorgehensweise

Die während der Schweißversuche vorliegende mechanische Beanspruchung der Schweißproben führt zu einer Beeinflussung des Schweißnahtgefüges insbesondere im Bereich der erstarrenden Schmelze. Um den Einfluss der Nahtflankenbewegungen auf die Gefügestruktur zu charakterisieren, wurden aus den Schweißproben metallografische Schliffe präpariert und lichtmikroskopisch untersucht. Die Präparation der zu untersuchenden Proben folgte einem festgelegten Präparationsplan, dessen strikte Einhaltung für die gleich bleibende Qualität der Schliffe ausschlaggebend und der in die Arbeitsschritte schleifen, polieren und ätzen untergliedert war. Die Festlegung des Präparationsplans orientierte sich an den Vorgaben der Schleif- und Poliermittelhersteller sowie den Hinweisen von SCHUMANN [2005].

Nach der Festlegung der zu untersuchenden Probenebene erfolgte das mechanische Heraustrennen der Probenrohlinge aus dem zu untersuchenden Abschnitt der Schweißprobe. Der entnommene Probenrohling wurde entfettet und in Epoxydharz Technovit 4071[®] der Firma Heraeus-Kulzer zur weiteren Bearbeitung kalt eingebettet. Die sich nach der Einbettung darstellende zylindrische Probenform hatte einen Durchmesser von 40 mm und erlaubte die Verwendung einer automatischen Schleif- und Poliermaschine vom Typ Phoenix Alpha[®] der Firma Bühler. Zur Entfernung der aus dem Trennprozess resultierenden Verformungsschichten sowie zum Vorbereiten auf den Poliervorgang wurden die Proben im Nassschleifverfahren beschliffen. Im Anschluss an den Schleifprozess erfolgte das Polieren der Proben mit diversen Diamantsuspensionen bis zu einer Feinheit von 0,25 µm. Zwischen den einzelnen Schleif- und Poliergängen wurden die Proben unter fließendem Wasser und anschließend im Ultraschallbad unter Einwirkung von Alkohol gründlich gereinigt, um den Eintrag von Schleifmittelresten aus der jeweiligen Vorstufe in die aktuelle Schleifstufe zu vermeiden. Der genaue Präparationsplan ist dem Anhang zu entnehmen.

Das abschließende Ätzen der polierten Probenoberfläche dient der Kontrastierung der Gefügestruktur, so dass eine Beurteilung der Proben möglich ist. Die polierten Proben wurden mittels 3%-iger alkoholischer Salpetersäure (*Nital*) in Tauchätzung bei Raumtemperatur angeätzt. Um eine gleichmäßige Ätzung der Oberfläche zu gewährleisten, war ein Schwenken der Probe in der Ätzlösung unerlässlich. Im Anschluss an die Ätzung erfolgte das Reinigen der Probe mit Alkohol sowie das Trocknen im Warmluftstrom eines Föns.

Für die mikroskopische Untersuchung der vorliegenden Schliffe stand ein Auflichtmikroskop vom Typ DM RX[®] der Firma Leica zur Verfügung, welches zur Dokumentation der Schliffe mit einer 3-Megapixel Digitalkamera vom Typ DC 300[®] ausgestattet war. Das Spektrum der Vergrößerung reichte von 50:1 bis 1000:1. Die Betrachtung der Schliffproben konnte im Hell- und Dunkelfeld erfolgen.

5.2 Qualitative Analyse des Werkstoffes und der Schweißnähte

Ausgangspunkt sämtlicher Schweißversuche war das vorliegende Blechmaterial der Stärken 6 und 10 mm aus S355J2G3. Die chemische Zusammensetzung ist den Tab. 3.1 und 3.4 zu entnehmen. Abb. 5.1 und 5.2 zeigen das sich über die Blechdicke darstellende Gefüge, beispielhaft für das 6 mm starke Probenmaterial. Das Gefüge weist eine zeilenförmige Walztextur auf, die zum überwiegenden Teil aus Ferrit (hell) und Perlit (dunkel) besteht.

Infolge der Nahtflankenbewegungen beim Schweißprozess und den damit verbundenen Zug-/Druckbeanspruchungen der Schweißprobe kommt es zu einer Schädigung des Schweißnahtgefüges durch Rissbildung in der Schweißnahtmitte. Um die Auswirkungen der Nahtflankenbewegung charakterisieren zu können, ist ein Vergleich mit einer in Ruhe geschweißten Probe unerlässlich. Abb. 5.3 zeigt den Querschliff einer durchgeschweißten Blechprobe $t=6$ mm, die während der Schweißung keiner Nahtflankenbewegung ausgesetzt war und als Referenz betrachtet werden kann. Deutlich zu erkennen sind die Wärmeeinflusszone (WEZ), die Schweißnahttraupe mit der Nahtwurzel sowie der unbeeinflusste Grundwerkstoff. Unzulässige Überhöhungen oder Einbrandkerben sind nicht vorhanden. Das Schweißgut weist die nach SCHULZE [2003] typisch dendritische Erstarrung auf. Die Schmelzgrenzen verlaufen parallel zu den ehemaligen Nahtflanken der Schweißnahtvorbereitung und weisen keine Parallelität auf, welche eine Heißrissbildung begünstigen würde. Im Gegensatz zur in Ruhe geschweißten Naht zeigt der Querschliff einer unter Betriebsbeanspruchung hergestellten Schweißnaht einen deutlichen Riss im Wurzelbereich bzw. in Höhe des Steges der Schweißnahtvorbereitung, vgl. Abb. 5.4. Eine genauere Betrachtung des Gussgefüges der Schweißnaht lässt eine unterschiedliche Orientierung der aus der Schweißschmelze gebildeten Dendriten erkennen. Im Bereich des vorhandenen Nahtmittenrisses wachsen die Dendriten nahezu horizontal aus den parallelen Stegen der ehemaligen Nahtvorbereitung heraus, siehe Abb. 5.5 und 5.6. Dieses gerichtete Wachstum führt unter Um-

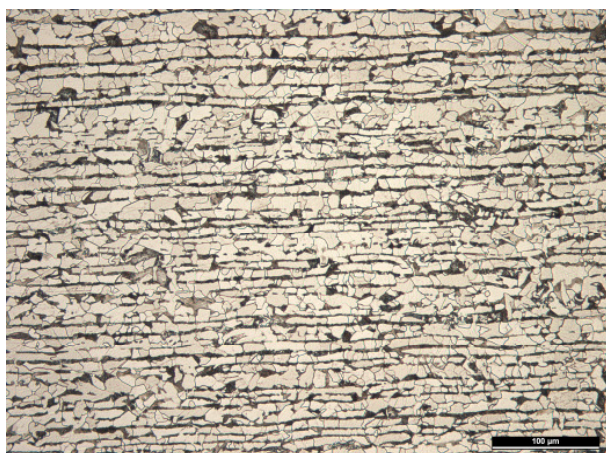


Abb. 5.1 Ferritisch-Perlitische Gefüge des Grundmaterials $t=6$ mm, Walztextur, HNO_3 , $V=200:1$



Abb. 5.2 Vergrößerung der Abb. 5.1, Ferrit (hell), Perlit (dunkel), HNO_3 , $V=500:1$

ständen dazu, dass die vor der Kristallisationsfront hergeschobenen, niedrigschmelzenden Verunreinigungen in der Restschmelze sich beim Abkühlen in der Nahtmitte konzentrieren. Es kommt zur Ausbildung einer Schwachstelle im Gussgefüge der Schweißnaht, die den Ausgangspunkt für die entstehenden Risse darstellt. Der im Schweißgut mittig liegende Riss verläuft interkristallin bzw. interdendritisch und weist somit alle Kennzeichen eines Erstarrungsrisse auf. Im oberen Bereich der Schweißnaht weisen die Dendriten eine Orientierung zur Decklage auf, vgl. Abb. 5.5. Dieses Verhalten ist als günstig zu bewerten, da eventuelle Verunreinigungen in der Schweißschmelze zur Nahtoberfläche abgedrängt und somit metallurgisch unwirksam werden.

Im Gegensatz zu den Schweißproben mit anfänglicher Probentrennung weisen die Schweißproben mit Eigenbadsicherung zusätzlich zu den Erstarrungsrisse in der Schweißnahtmitte, Fehler im Bereich der Schweißnahtwurzel auf. Wie aus den Abb. 5.7 und 5.8 zu erkennen, ist der Grund der Nahtvorbereitung während der Schweißung un-

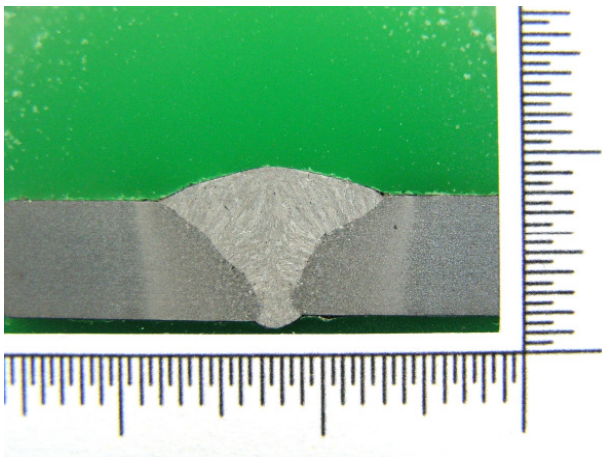


Abb. 5.3 Querschliff durch Schweißnaht, hergestellt ohne Nahtflankenbewegung, Blechstärke $t=6$ mm

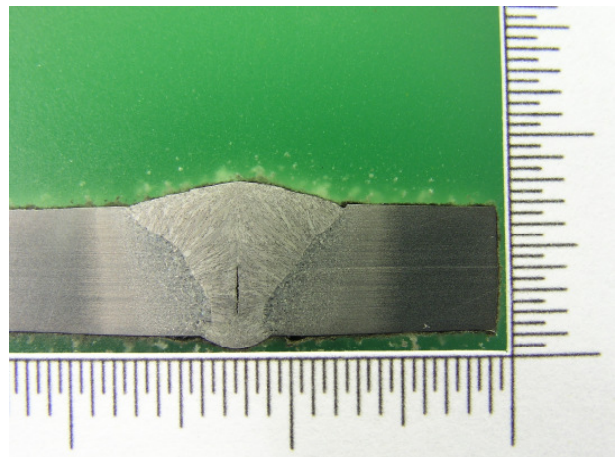


Abb. 5.4 Querschliff durch Schweißnaht, Frequenz 0,5 Hz, Amplitude $\pm 0,1$ mm, Blechstärke $t=6$ mm

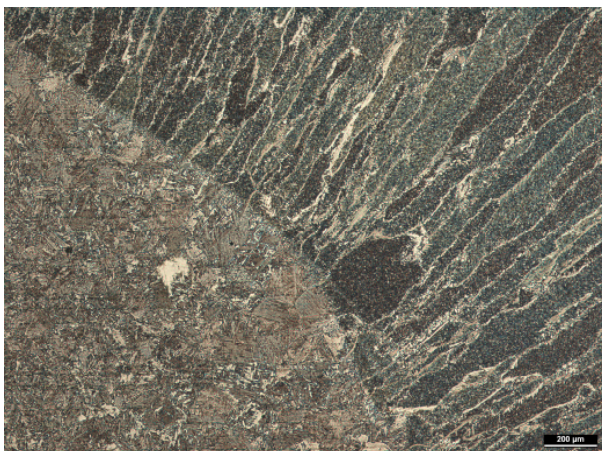


Abb. 5.5 Zur Decklage gerichtete Dendriten, Vergrößerung der Abb. 5.4, HNO_3 , $V=50:1$

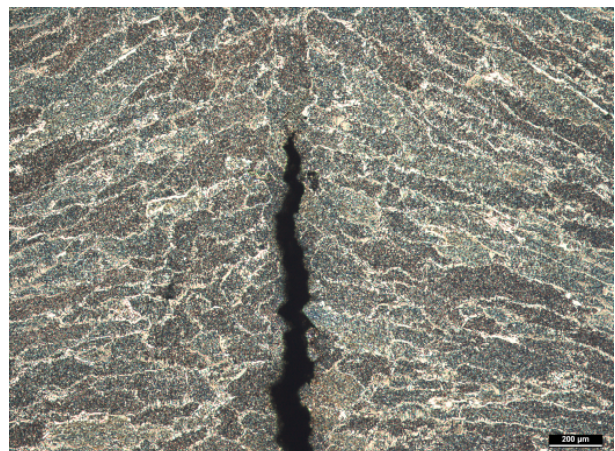


Abb. 5.6 Riss in Nahtmitte mit horizontalen Dendriten, Vergrößerung der Abb. 5.4, HNO_3 , $V=50:1$

ter Bewegung der Nahtflanken nicht ausreichend aufgeschmolzen worden, so dass sich ein klassischer Wurzelfehler ausgebildet hat. Es ist anzumerken, dass dieser Fehler ausschließlich bei den Schweißversuchen unter Bewegung der Nahtflanken auftrat. Die in Ruhe hergestellten Schweißproben wiesen keinerlei Mängel auf. Eine genauere Betrachtung der Schweißnaht lässt erkennen, dass diese einen Versatz zur linken Seite aufweist, vgl. Abb. 5.7. Dieser Sachverhalt lässt den Schluss zu, dass der Lichtbogen während der Schweißung nicht kontinuierlich in der Nahtmitte geführt oder zur einen Nahtflankenseite hin abgelenkt wurde. Aufgrund des Versuchsaufbaus lässt sich ausschließen, dass die Lichtbogenführung für die in Ruhe hergestellte Schweißnaht eine andere war, als die unter einer Nahtflankenbewegung (Roboterprogramm und Probenform war identisch). Eine Ablenkung durch den einseitigen Anschluss des Schweißmassekabels kann ebenfalls ausgeschlossen werden, da jeder Lagerschlitten einen gleichberechtigten Masseanschluss besaß. Es lässt sich vermuten, dass durch die Fixierung der Schweißprobe auf einem starren Lager bzw. einem beweglichen Lagerschlitten es zu einer einseitigen Auslenkung der Probe während des Schweißversuches kommt. Infolge dieser Auslenkung wird der Lichtbogen zur linken Nahtflanke abgelenkt und schmilzt diese auf. Der abschmelzende Zusatzwerkstoff vermag den Grund der Nahtvorbereitung nicht aufzuschmelzen, was somit letztlich zur Ausbildung eines in Nahtlängsrichtung intermittierenden Wurzelfehlers führt, vgl. Abb. 3.31, 4.32 und 5.8.

Ein Vergleich zwischen den in Ruhe bzw. unter Bewegung der Nahtflanken hergestellten Schweißnähten zeigt keine wesentlichen Unterschiede in der Gefügestruktur bzw. dem Aufbau der WEZ. Aufbau und Gefüge der WEZ ist exemplarisch für eine Schweißprobe der Blechdicke $t=6$ mm in Abb. 5.9 dargestellt, die unter einer Bewegungsamplitude von $\pm 0,1$ mm und einer Frequenz von 0,5 Hz verschweißt worden ist. Der Grundwerkstoff (links) zeigt ein ferritisch-perlitisches Gefüge mit ausgeprägter Walztextur. Die sich anschließende teilaustenitisierte Gefügezone (Erwärmung um A_{c1} , unvollständige Umwandlung) weist Anzeichen der beginnenden Feinkornbildung auf. Deutlich zu erkennen ist das Auflösen und Wiederbilden der vorhandenen Perlitkörner

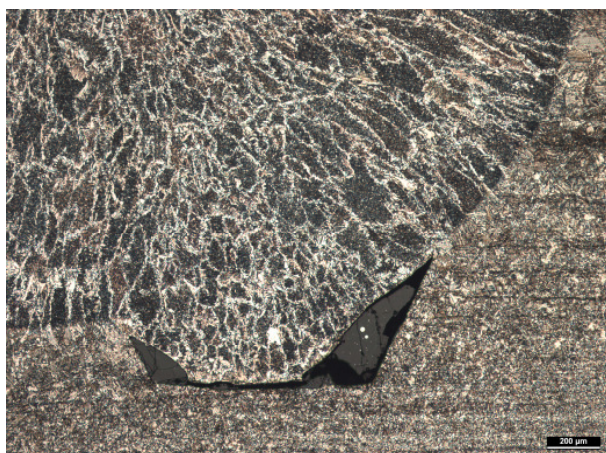


Abb. 5.7 Wurzelbereich einer Schweißprobe $t=10$ mm, Frequenz 0,25 Hz, Amplitude $\pm 0,2$ mm, HNO_3 , $V=50:1$

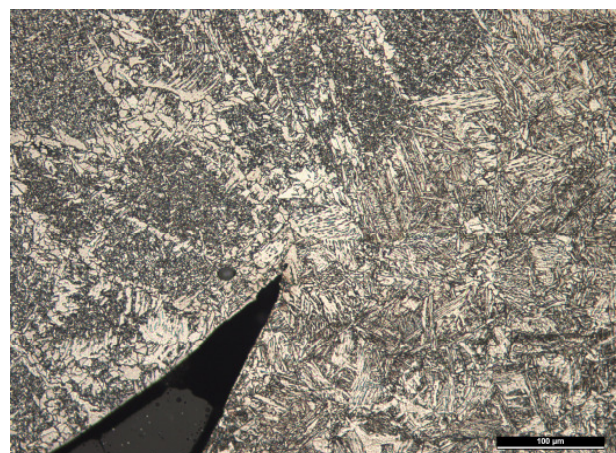


Abb. 5.8 Übergang Schweißgut / Grobkornzone mit Wurzelfehler, Vergrößerung der Abb. 5.7, HNO_3 , $V=200:1$

(*retransformierter Perlit*). Von einer Beeinträchtigung der Bauteilnutzung bedingt durch das sich darstellende Gefüge ist nicht auszugehen. Mit dem Auftreten von Temperaturen knapp über A_{c3} (Normalglühtemperatur) kommt es zur doppelten Umkristallisation und damit Kornfeinung des Gefüges. Diese Feinkornzone weist häufig bessere Eigenschaften auf als der unbeeinflusste Grundwerkstoff. An die Feinkornzone schließt sich die Grobkornzone an. Infolge der starken Überhitzung kommt es zur Ausbildung eines grobkörnigen Gefüges mit *Widmannstättenstruktur*. Bedingt durch das starke Kornwachstum besitzt das Gefüge eine geringere Zähig- und Festigkeit, vgl. SCHUL [2003]. Durch die geringere Korngrenzfläche weist die Grobkornzone tendenziell eine höhere Belegungsichte mit Verunreinigungen auf, was zu einer Vergrößerung der Neigung zur Bildung von Wiederaufschmelzrissen führt. Weiterhin kennzeichnet die Grobkornzone den Bereich der höchsten Härtesteigerung, die nach BOESE [1995] jedoch bei unlegierten, niedriggekohten Baustählen keine Gefahr darstellt. Das Gussgefüge der Schweißgutzone besitzt die typische dendritische Erstarrungsstruktur. Die Orientierung des Gefüges bildet sich nach dem vorherrschenden Temperaturgradienten bei der Abkühlung aus und nimmt Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Schweißverbindung. Das Zusammentreffen der sich bildenden Dendriten in der Schweißnahtmitte führt zur Ausbildung einer schmalen Seigerungszone. Diese stellt einen Schwachpunkt der Verbindung dar und ist Ausgangspunkt für die entstehenden Risse. Das sich darstellende Schweißgut ist ein Legierungsgemisch aus dem aufgeschmolzenem Grundwerkstoff und dem eingebrachten Zusatzwerkstoff. Die Erstarrung erfolgt innerhalb eines breiten Temperaturbereiches.

Aufgrund der für alle Schweißversuche identischen Schweißparameter sowie der aufgezeichneten Versuchsdaten ist davon auszugehen, dass die im Schweißgut auftretenden Risse durch die Betriebsbeanspruchung während des Schweißprozesses verursacht werden. Es lässt sich folgern, dass für die Rissbildung die Zugbeanspruchung der Schweißprobe aus der aufgebrachten Bewegungsamplitude mitverantwortlich sein muss.

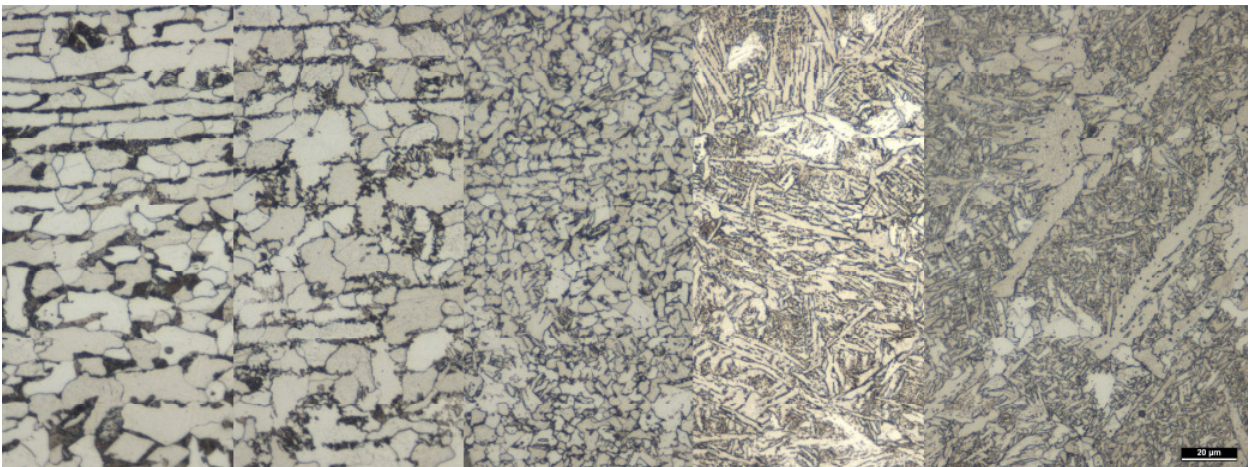


Abb. 5.9 Gefügebilder einer Schweißnaht, Blechstärke $t=6$ mm, S355 J2 G3, Bewegungsamplitude $\pm 0,1$ mm, Frequenz 0,5 Hz, HNO_3 , $V=500:1$

5.3 Heißrisse

Das Auftreten von Rissen im Bereich der Schweißnahtmitte ist im Wesentlichen auf das Vorhandensein von Zugbeanspruchungen und Verformungen während und nach dem Schweißprozess zurückzuführen. Die aus den Nahtflankenbewegungen resultierenden Verformungen der hochoverhitzten Bereiche der Schweißnaht und der WEZ addieren sich zu den Verformungen, welche aus der schrumpfungsbedingten Selbstbeanspruchung beim Abkühlen herrühren und bilden eine günstige Voraussetzung für die Entstehung von Heißrissen. Heißrisse sind nach dem DVS-Merkblatt 1004-1 als eine Risserscheinung definiert, die in Anwesenheit von niedrigschmelzenden sowie spröden Substanzen auf den Korngrenzen bei hohen Temperaturen im Verlauf und nach Beendigung des Schweißprozesses entstehen können. Aufbauend auf dieser Definition ist davon auszugehen, dass die vorliegenden Risserscheinungen im Schweißgut der durchgeführten Schweißversuche als Heißrisse einzustufen sind.

5.3.1 Voraussetzung und Arten der Heißrissbildung

Die Entstehung eines Heißrisses resultiert vereinfachend aus der fehlenden Kraftübertragung zwischen den einzelnen Körnern, infolge eines Flüssigkeitsfilms aus niedrigschmelzenden Substanzen, z.B. FeS, auf den Korngrenzen, vgl. u. a. [BOESE 1995, VDE 1997, WOHL 2001, SCHUL 2003, SCHUS 2004]. Für die Rissentstehung ist somit das Vorhandensein einer spröden oder flüssigen Phase während der Erstarrung oder Gefügewandlung erforderlich, welche die Korngrenzen flächig benetzt; eine koagulierende Phase hingegen würde zu einer Reduzierung der Heißrissbildung führen. Die Breite des Erstarrungsintervalls der heißrissauslösenden Phase ist von ihrem Seigerungszustand, d.h. von der Menge an heißrissfördernden Elementen abhängig. Ebenso neigt ein feinkörniges Gefüge weniger zur Heißrissbildung, da sich die eventuell vorhandene flüssige Phase über eine größere Kornoberfläche verteilen müsste. Der für die Heißrissentstehung erforderliche Flüssigkeitsfilm entsteht unter anderem durch das Vorhandensein unerwünschter Begleitelemente im Stahl, vorrangig sind Schwefel und Phosphor zu nennen, welche zur Bildung niedrigschmelzender Eutektika (Sulfide, Phosphide) führen. Damit es zu einer Entstehung von Heißrissen kommt, müssen nach SCHUSTER [2004] im Wesentlichen drei Bedingungen erfüllt sein:

- Vorhandensein einer niedrigschmelzenden Phase im Korngrenzbereich
- Auftreten von Zugspannungen während der Erstarrung und Abkühlung
- Vorliegen einer grobkörnigen oder grobdendritischen Gefügestruktur

Wie aus den Abb. 5.6 bis 5.8 exemplarisch zu erkennen, weist das Schweißgut der untersuchten Schweißverbindungen eine grobdendritische Gefügestruktur auf. Zugspannungen während der Erstarrung bzw. Abkühlung der Schweißnaht treten sowohl durch die temperaturbedingte Schrumpfung des Bauteils als auch durch die festgelegte Be-

wegung der Schweißnahtflanken auf. Der Nachweis des Vorhandenseins einer niedrigschmelzenden Phase im Korngrenzbereich konnte, aufgrund der fehlenden apparativen Ausstattung nur indirekt erfolgen, siehe Kapitel 6.3. Alle Kriterien, die für eine Entstehung von Heißrissen erforderlich sind, werden erfüllt, so dass die vorhandenen Risse als Heißrisse einzustufen sind.

Unterschieden werden die Heißrisse nach Ihrer Entstehungsart und –form in Erstarrungsrisse (*solidification cracks, S.C.*), Wiederaufschmelzriszen (*liquation cracks, L.C.*) sowie Risse infolge von Verformungsabfall (*Ductility Dip Cracks, D.D.C.*).

Erstarrungsrisse entstehen bei der Kristallisation der Schweißschmelze. Die sich vor der Kristallisationsfront bildende Restschmelze weist seigerungsbedingt eine niedrigere Erstarrungstemperatur als die sich bildenden Dendriten auf. Gegen Ende des Erstarrungsvorganges kann es zum Auftreten von Rissen kommen, wenn die noch vorhandene Restschmelze nicht mehr ausreicht, um verformungsbedingte Gefügetrennungen auszuheilen. In der Regel können die Risse bereits mit bloßem Auge oder einer Lupe erkannt werden. Der Rissverlauf erfolgt interkristallin bzw. interdendritisch.

Wiederaufschmelzrisse entstehen beim Schweißen im Bereich der an das Schweißschmelzbad angrenzenden WEZ oder in den überschweißten Raupen von Mehrlagenschweißungen und reichen bis an die Schmelzlinie heran. Bedingung für das mögliche Auftreten von Wiederaufschmelzriszen ist das Vorhandensein von schmelzpunkterniedrigende Elementen entlang der Korn-/Dendritengrenze. Infolge auftretender Zugspannungen (Schrumpfung, äußere Einwirkung) kommt es zum Aufreißen des Werkstoffes entlang des flüssigen Korngrenzenfilms. Der Wiederaufschmelzriss besitzt eine frei erstarrte Oberfläche, auf der schmelzpunkterniedrigende Elemente nachzuweisen sind. Die Rissbildung erfolgt interkristallin und besitzt mikroskopische Dimensionen (Nachweis im Schliffbild). Eine Unterscheidung zwischen interdendritischen Aufschmelzriszen im Schweißgut und Erstarrungsriszen ist nicht möglich.

Risse durch Verformungsabfall entstehen in einiger Entfernung zur Schmelzlinie in der WEZ. Es handelt sich um interkristalline Trennungen, die im festen Zustand und unmittelbar nach dem Schweißen entstehen. Ein Aufschmelzen der Korngrenzen findet nicht statt. Der Rissnachweis ist zuverlässig nur unter dem Mikroskop im Schliffbild möglich.

5.3.2 Theorie der Heißrissentstehung

Die theoretischen Erklärungen zu Heißrissentstehung sind mannigfaltig und stellen alle den metallurgischen Aspekt in den Vordergrund. Allen Theorien gemeinsam sind das Vorhandensein einer niedrigschmelzenden Phase im Bereich der Korngrenzen sowie das Vorliegen einer Verformung. Des Weiteren weist die Heißrissbildung eine Temperatur- und Zeitabhängigkeit auf, vgl. KLIN [1980]. Eine sehr gute Übersicht zu den diversen Theorien und Forschungsarbeiten ist in SCHUSTER [2004] zu finden, so dass an dieser Stelle lediglich die bekannten Theorien von BORLAND [1960, 1961] und PROKHOROV [1962A-C, 1965, 1968] kurz vorgestellt werden.

Grundlage der BORLANDSCHEN Heißrisstheorie bildet das Mengenverhältnis zwischen fester und flüssiger Phase während der Erstarrung der Schweißschmelze. Das Erstarrungsintervall wird in vier Stadien unterschiedlicher Heißrissempfindlichkeit unterteilt. Das erste Stadium kennzeichnet das Einsetzen der Erstarrung der Schweißschmelze. Es liegt ausreichend flüssige Phase vor. Eine Entstehung von Heißrisen ist nicht möglich, da die wenigen Kristalle von der Schmelze umschlossen sind, so dass auftretende Verformungen kompensiert werden können. Das zweite Stadium kennzeichnet den Beginn des Zusammenwachsens der sich entwickelnden Kristalle. Eine Bildung von Heißrisen ist möglich, jedoch unwahrscheinlich, da die vorhandene Schmelze in der Lage ist, entstehende Werkstofftrennungen aufzufüllen. Auftretende Risse können ausheilen, sofern die verbleibende Schmelze einen Zugang zu den Rissen hat. Im dritten Stadium kann nur noch eine geringe Deformation ohne Rissbildung aufgenommen werden. Die vorhandene Restschmelze ist nicht in der Lage, rissartige Trennung auszuheilen. Eine filmartige Benetzung der Korngrenzen mit flüssiger Restschmelze wirkt in diesem Stadium besonders Heißriss fördernd. Das dritte Stadium stellt den kritischen Abkühlungsbereich mit der größten Anfälligkeit zur Heißrissbildung dar. Mit der vollständigen Erstarrung des Werkstoffes beginnt das vierte und letzte Stadium. Das Material zeigt ein ausreichend duktils Verformungsverhalten. Heißrisse werden nicht länger gebildet.

Den Arbeiten von PROKHOROV entsprechend existiert für jeden Werkstoff ein Temperaturgebiet der Heißrisanfälligkeit, das als „*Temperaturintervall der Sprödigkeit*“ (TIS) definiert wird und innerhalb dessen es zum Auftreten von Heißrisen kommen kann. Das TIS wird nach oben begrenzt durch die Temperatur, bei der es im Zuge der Erstarrung zu einer erstmaligen Behinderung der Zirkulation der flüssigen Phase um die vorhandenen Kristalle kommt. Diese obere Temperaturgrenze liegt zwischen der Liquidus- und Soliduslinie des Werkstoffes. Die untere Grenze des TIS liegt unterhalb der Soliduslinie der Werkstoffmatrix und kennzeichnet die Temperatur, bei der alle Korngrenzenfilme gerade erstarrt sind. Die Größe des „kritischen“ Kristallisationsintervalls, in der die Wahrscheinlichkeit zur Bildung von Kristallisationsrissen am größten ist, wird gemäß PROKHOROV von der chemischen Zusammensetzung, dem Verunreinigungsgrad, von Seigerungen, der Beschaffenheit der Korngrenzen, der Größe und Form der Kristallite sowie der Abkühlungsgeschwindigkeit bestimmt. Neben dem Vorliegen dieses kritischen Temperaturintervalls ist zur Entstehung von Heißrisen eine Minimalverformung sowie, aufgrund der Dynamik des Schweißprozesses, eine Mindestverformungsgeschwindigkeit notwendig. Das Temperaturintervall der Sprödigkeit eines Werkstoffes ist demnach durch die folgenden drei charakteristischen Größen bestimmt:

- die *Temperaturspanne*, innerhalb der beim vorliegenden Werkstoff Heißrisse möglich sind
- die nötige *Minimalverformung* (kritische Dehnung)
- die *Minimalverformungsgeschwindigkeit* (kritische Dehnungsgeschwindigkeit)

Die Heißrissneigung eines Werkstoffes lässt sich quantitativ bewerten, wenn die oben genannten charakteristischen Größen von TIS bekannt sind. Aufbauend auf den genannten Charakteristika lassen sich alle drei Heißrissarten mit der PROKHOROVschen Theorie erklären.

5.3.3 Beurteilung der Schweißnähte und Schlussfolgerungen

Wie die qualitative Analyse der Schweißnähte zeigt, weisen sämtliche unter Betriebsbeanspruchung hergestellten Schweißnähte, Heißrisse in Form von Erstarrungsrisse in der Schweißnahtmitte auf. Das Auftreten der Risse erfolgt senkrecht zur Betriebsbeanspruchung. Wiederaufschmelzrisse oder Risse durch Verformungsabfall konnten in den untersuchten Schliffen nicht gefunden werden. Aufgrund der identischen Schweißparameter für Schweißungen in Ruhe bzw. unter Nahtflankenbewegung ist davon auszugehen, dass die Rissentstehung aus der mechanischen Beanspruchung der Proben während des Schweißprozesses herrührt.

Trotz optimierter Schweißparameter scheint eine Entstehung von Heißrisen beim Schweißen unter Betriebsbeanspruchung *nicht* vermeidbar. Die zur Heißrissbildung erforderlichen Minimalverformungen und Geschwindigkeiten werden bereits durch eine Bewegungsamplitude von $\pm 0,10$ mm unter einer Frequenz von 0,25 Hz erreicht. Rissgröße und Anzahl werden durch die Bewegungsamplitude und Frequenz signifikant beeinflusst.

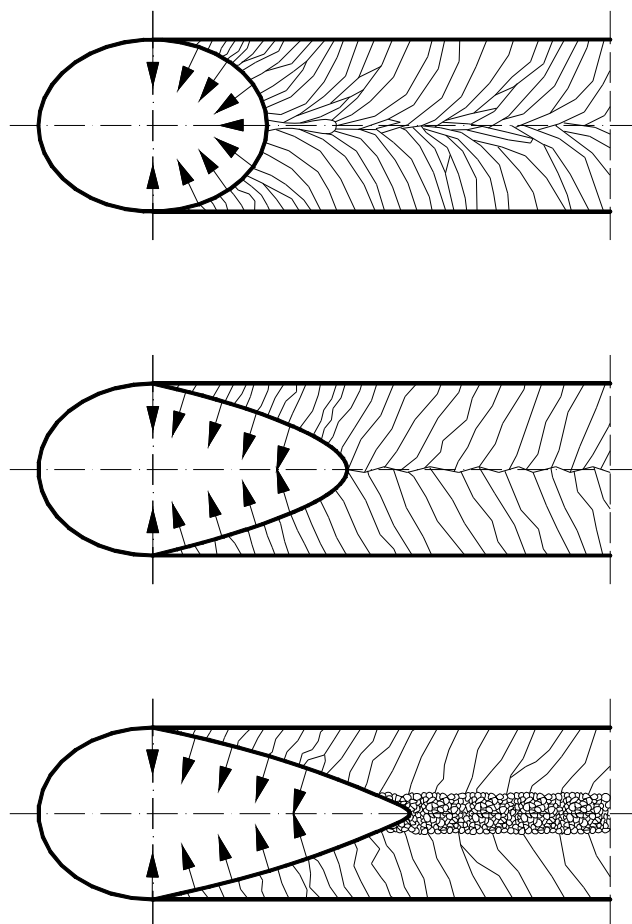
Aufgrund der Nichtvermeidbarkeit des Auftretens von Heißrisen beim Schweißen unter Betriebsbeanspruchung, können schweißtechnische Gegenmaßnahmen zu Heißrissvermeidung ausschließlich dazu dienen, die Auswirkungen der Rissbildung einzuschränken und Heißrissgefährdung zu minimieren. Es lassen sich im Wesentlichen drei Maßnahmenbereiche unterscheiden:

- Chemische Zusammensetzung des Werkstoffes und der Schweißschmelze
- Wahl der Schweißparameter (Schweißgeschwindigkeit, Wärmeeintrag, etc.)
- Festlegung der Nahtgeometrie

Als besonders nachteilig wirken sich die Elemente Schwefel und Phosphor auf die Heißrissbeständigkeit von un- und niedriglegierten Stählen durch Bildung von niedrigschmelzenden Eutektika aus [KLIN 1975, HANUS 1993, WOHL 2001]. Es ist daher geboten, diese schädlichen Elemente auf ein Minimum zu begrenzen (Werkstoffwahl) oder die Bildung niedrigschmelzender Verbindungen durch schweißmetallurgische Gegenmaßnahmen zu verhindern. WOHLFAHRT [2001] empfiehlt das Abbinden vorhandener Schwefelanteile durch das gezielte Zulegieren von Mangan. Mit dem Vorliegen eines Mangan/Schwefel-Verhältnis größer als 35 wird gemäß der Empfehlung die Heißrissbildung auch in voll-austenitischen Stählen, bei einer Schweißung in Ruhe, vermieden. Das sich durch die Zugabe von Mangan bildende Mangansulfid erstarrt bei 1620 °C und wirkt als Kristallisationskeim, wodurch eine Kornfeinung der Schmelze erreicht werden

kann. Weiterhin führt eine Erhöhung des Mangangehaltes zu einer Abnahme der Wiederaufschmelzriszneigung [THIER 1981, BÖHME 1984, 1987]. Zur Verhinderung des filmartigen Ausbreitens des Schwefels auf den Korngrenzen empfehlen TREMMER und SCHREIBER [1995] die Absenkung des Kohlenstoffgehaltes sowie die Zugabe der Mikrolegierungselemente Titan und Zirkon.

Die wichtigsten Parameter zur Beeinflussung der Kristallisationsmorphologie der erstarrenden Schweißschmelze sind die Schweißgeschwindigkeit v bzw. die Wärmeeinbringung Q [SCHUL 2003, SCHUS 2004]. Ist die vorhandene Schweißgeschwindigkeit kleiner oder gleich der Kristallisationsgeschwindigkeit R_{max} der sich aus der Schmelze bildenden Kristalle, kommt es zur Ausbildung einer elliptischen Schmelzbadform, vgl. Abb. 5.10a. Die ins Nahtinnere wachsenden Kristalle orientieren sich, bedingt durch die elliptische Form der Erstarrungsfront, in der Nahtmitte parallel zur Schweißrichtung. Vorhandene Verunreinigungen werden bei kleiner Wärmeeinbringung zur Nahtoberfläche abgedrängt, eine ausgeprägte Mittelrippe kann sich nicht ausbilden. Aufgrund des Ausbleibens einer Seigerungskonzentration in der Schweißnahtmitte nimmt die Wahrscheinlichkeit des Entstehens von Heißrissen ab. Wird die Schweißgeschwindigkeit auf Werte größer der Kristallisationsgeschwindigkeit erhöht, kommt es zum Zurückbleiben der erstarrenden Schweißschmelze. Das Schmelzbad geht von einer elliptischen in eine



a) Elliptisches Schmelzbad,
 Q und v sind ausreichend klein

b) tropfenförmiges Schmelzbad
 Q und v sind groß

c) heterogene Keimbildung erzeugt
Feinkornzone in Nahtmitte
 Q und v sind sehr groß

Abb. 5.10 Einfluss der Schweißgeschwindigkeit und des Wärmeeintrages auf das Erstarrungsgefüge der Schweißnaht

tropfenförmige Kontur über, vgl. Abb. 5.10b. Die sich bildenden Kristalle stoßen senkrecht aufeinander. Vorhandene Verunreinigungen in der Schmelze konzentrieren sich in der Nahtmitte. Es kommt zur Ausbildung einer Seigerungszone, wodurch die Heißrissgefahr deutlich zunimmt. Eine weitere Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit bzw. des Wärmeeintrages kann zu einer heterogenen Keimbildung und der Entstehung feinkörniger Dendriten im Bereich der Schweißnahtmittellinie führen, vgl. Abb. 5.10c. Durch die große Anzahl der vorhandenen Korngrenzen kommt es zur Abnahme der Verunreinigungsdichte, da die vorhandenen Verunreinigungen sich auf einer größeren Korngrenzfläche verteilen müssen. Die Gefahr der Heißrissbildung sinkt.

Neben der Schweißgeschwindigkeit und dem Wärmeeintrag kann durch Wahl einer günstigen Nahtgeometrie (Schweißnahtvorbereitung) die Heißrissgefahr minimiert werden. Tiefe Schmelzbäder mit parallelen Schmelzgrenzen führen zu einer Anreicherung von Verunreinigungen in der Schweißnahtmitte. Durch die Ausbildung einer flachen Schmelzbadgeometrie orientieren sich die wachsenden Kristalle zur Nahtoberfläche. Vorhandene Verunreinigungen werden in Richtung der Decklage abgedrängt und sind somit metallurgisch unwirksam, wodurch die Heißrissgefahr abnimmt. SCHUSTER [2004] empfiehlt aus Sicht der Heißrissbeständigkeit ein Verhältnis von Schweißnahtbreite zur Tiefe von größer 1. Wie aus Abb. 5.5 und 5.7 zu erkennen, tritt die Rissentstehung in den untersuchten Proben in den Bereichen der parallelen Schmelzlinien auf (Stegbereich der Nahtvorbereitung). Im oberen Bereich der Schweißnaht kann die Orientierung der Dendriten zur Decklage offensichtlich zur Verbesserung der Rissnempfindlichkeit beitragen.

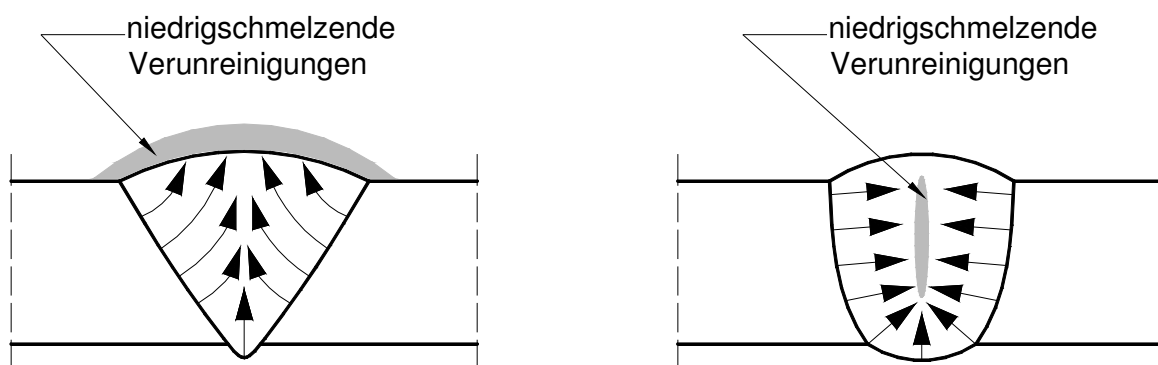


Abb. 5.11 Einfluss der Schweißnahtform auf das Erstarrungsmuster

Kapitel 6

Bestimmung der temperaturabhängigen Werkstoffkennwerte

6.1 Notwendigkeit der Bestimmung und Voraussetzungen

Neben den experimentellen Untersuchungen zur Auswirkung einer Nahtflankenbewegung während des Schweißprozesses auf die Nahtgüte bzw. das Bauteil, sollen theoretische Untersuchungen mittels der FE-Methode eine Prognose über die Wärme-, (Eigen)spannungs- und Kräfteverteilung während und nach dem Schweißprozess erlauben. Um eine zuverlässige Aussage aus den numerischen Berechnungen abzuleiten, ist es von entscheidender Wichtigkeit, den Schweißprozess möglichst realitätsnah und ausreichend genau abzubilden. Die numerische Bestimmung des transienten Schweißtemperaturfeldes sowie des strukturellen Verhaltens des Bauteils bedingt neben der Modellierung der Geometrie, des Wärmeeintrages, des Wärmeüberganges sowie der mechanischen Einwirkung, die Angabe der thermophysikalischen Materialkennwerte.

Als grundlegendes Problem für die numerische Simulation stellt sich das Fehlen von Angaben zum temperaturabhängigen Materialverhalten eines Baustahls bis in den Hochtemperaturbereich dar. Eine zuverlässige und ausreichend genaue Beschreibung des Werkstoffverhaltens ist somit nur bedingt möglich. Angaben zum Werkstoffverhalten eines S355J2G3 sind in der Literatur nur unzureichend beschrieben und gehen selten über eine Temperatur von 600 °C hinaus, vgl. DVS [1997]. Die von RICHTER [1973] durchgeführten Untersuchungen zum physikalischen Verhalten der Eisenwerkstoffe können einen Anhalt geben, lassen jedoch eine direkte Übertragung auf die heute üblichen Stahllegierungen nur eingeschränkt zu. Es lässt sich jedoch feststellen, dass bisherige Forschungsarbeiten zur Simulation des Temperaturfeldes und der Eigenspannungsverteilung auf den genannten Quellen aufbauen. Fehlende Angaben werden zum Teil durch lineare Extrapolationen oder Konstantsetzung einzelner Kennwerte scheinbar kompensiert (siehe z.B. [RYKA 1957, PITT 1992, WEIB 1994, HAMA 1996, SCHI 1998, LIND 1999, MEHM 2003]). Die dabei getroffenen Annahmen spiegeln die Wirklichkeit nur unzureichend wider. Vielmehr dienen diese Vereinfachungen der Anpassung des numerischen Modells an die Wirklichkeit durchgeführter Versuche. Um eine, hinsichtlich der Werkstoffmodellierung, unverfälschte numerische Simulation zu generieren, ist es erforderlich, die temperaturabhängigen Materialkennwerte für einen S355J2G3 im Vorfeld der Simulation zu bestimmen.

Die Ermittlung sämtlicher Werkstoffkennwerte erfolgte an Probenmaterial, welches aus einer Charge von Blechtafeln $t=10$ mm stammte, die zur Durchführung der in Kapitel 3 beschriebenen Schweißversuche diente. Um eine einwandfreie Zuordnung des verwendeten Stahls und damit einen Vergleich mit anderen S355-Stählen zu ermöglichen, wird auf das Ergebnis der chemischen Analyse in Tab. 3.4 verwiesen. Aufgrund der geringen Gehalte an Niob und Titan ist der Stahl als nicht stabilisiert zu betrachten. Die übrigen Elemente befinden sich innerhalb der nach DIN EN 10025 geforderten Grenzen.

6.2 Kerbschlagbiegeversuch

Ausreichende (Schlag-)Zähigkeitseigenschaften des Werkstoffes sind die Voraussetzungen für eine sprödebruchssichere Konstruktion. Zur Charakterisierung der Trennbruchneigung wurden nach DIN EN 10045 Kerbschlagbiegeversuche mit Charpy-V-Proben (Probenmaße 10 mm x 10 mm x 55 mm) in Längs- und Querrichtung zur Walzung durchgeführt. Der Kerbschlagbiegeversuch liefert lediglich einen Vergleichsmaßstab für die Neigung zum Trennbruch, das Ergebnis der Prüfung gilt nur für die Versuchsbedingungen und ist nicht auf ein Bauteil übertragbar. Das sich darstellende Untersuchungsergebnis gibt einen Aufschluss über das Werkstoffverhalten beim Vorliegen einer behinderten Verformung infolge des kerbbedingten dreiachsigen Spannungszustandes im Restquerschnitt der Probe sowie bei verschiedenen tiefen Temperaturen. Der

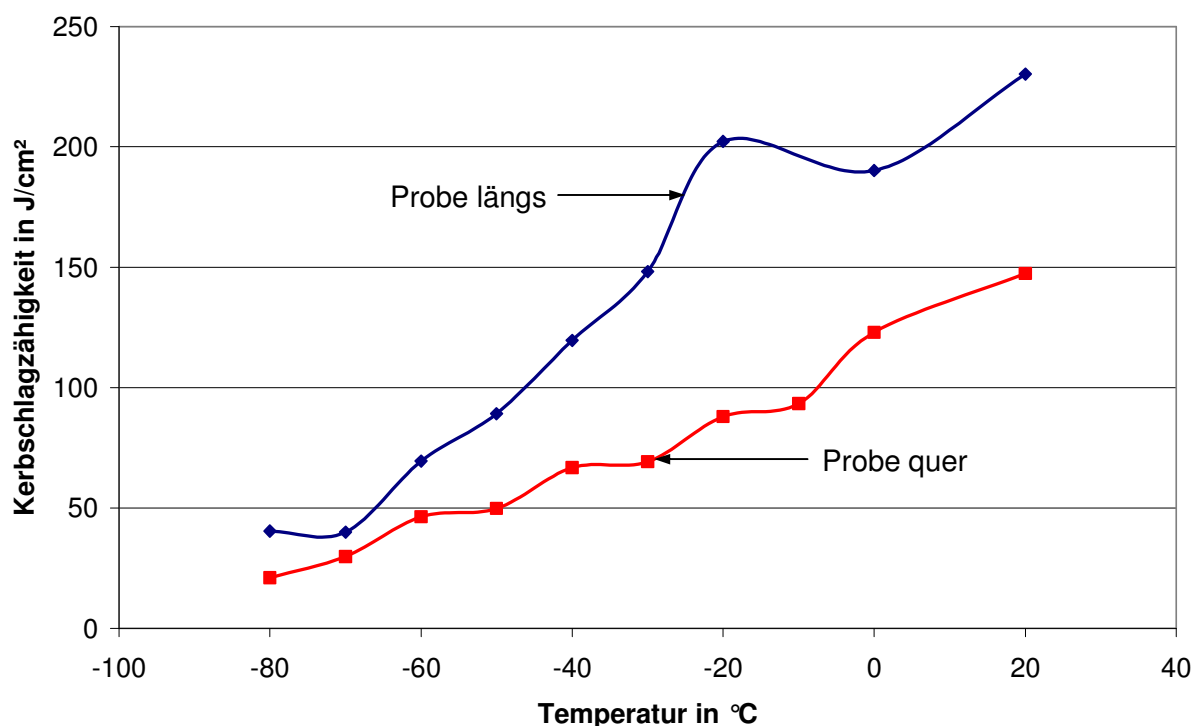


Abb. 6.1 Ergebnis der Kerbschlagbiegeversuche mit Charpy-V-Probe nach DIN EN 10045

aus den Versuchen bestimmte Verlauf der K-T-Kurve zeigt die klassische S-Form für einen krz-Stahl. Wie aus der Abb. 6.1 ersichtlich, befindet sich die Übergangstemperatur $T_{ü27}$ bei ca. -70 °C , der Übergang von der Hoch- zur Tieflage erstreckt sich auf einen Bereich von 20 bsi -80 °C . Der untersuchte Baustahl liegt somit im Anforderungsprofil der DIN EN 10025.

6.3 Warmzugversuche

Wie bereits dargelegt ist es von entscheidender Wichtigkeit, die Werkstoffparameter für die numerische Simulation realitätsnah zu erfassen. Um dies zu gewährleisten, wurden Warmzugversuche zur Auffindung der verschiedenen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen bei unterschiedlichen Temperaturen und Dehngeschwindigkeiten am vorhandenen Blechmaterial $t = 10\text{ mm}$ aus S355J2G3 durchgeführt. Grundlage für alle durchgeführten Versuche ist die DIN 10002-5. Aus der Summe der einzelnen Spannungs-Dehnungs-Diagramme lässt sich durch Aneinanderreihung eine Spannungs-Dehnungs-Temperatur-Fläche erzeugen. Durch Interpolation innerhalb der numerischen Simulation kann somit jeder Dehnung, bei gegebener Temperatur, eine Spannung zugeordnet werden. Diese Zuordnung ist dabei umso genauer darstellbar, je mehr Spannungs-Dehnungs-Verläufe aneinandergereiht wurden. Zur Begrenzung des Versuchsaufwandes sind je untersuchter Dehngeschwindigkeit 25 Warmzugversuche sowie diverse Tastversuche gefahren worden. Bei einer maximalen Versuchstemperatur von 1200 °C ergibt sich aus dieser Überlegung ein Untersuchungsabstand von 50 K .

6.3.1 Parameterfeld der Dehngeschwindigkeiten

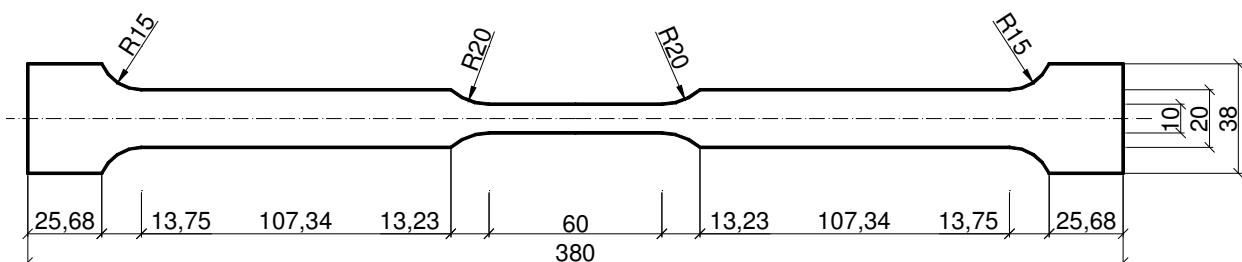
Bekanntermaßen treten Abhängigkeiten der mechanischen Werkstoffkennwerte von der Dehngeschwindigkeit beim Zugversuch auf, vgl. BÖTT [2002]. Wird eine Stahlprobe einer höheren Beanspruchungsgeschwindigkeit unterworfen, so kommt es bei Raumtemperatur zu einer Erhöhung der Streckgrenze, im Gegenzug verringert sich diese bei niedrigeren Dehngeschwindigkeiten. Dieser Effekt muss somit auch Auswirkung auf die Beanspruchbarkeit eines Bauteils haben, welches durch eine äußere Einwirkung beansprucht wird. Ein mit einer konstanten Wegamplitude beaufschlagter Versuchskörper wird daher bei unterschiedlichen Frequenzen verschieden große Dehngeschwindigkeiten aufweisen. Somit muss die Beanspruchbarkeit des Werkstoffes für verschiedene Dehngeschwindigkeiten in der numerischen Simulation Berücksichtigung finden, sollen realitätsnahe Ergebnisse mittels Berechnung erzielt werden. Zu diesem Zweck wurden die Warmzugversuche in drei Versuchsreihen mit unterschiedlichen Dehngeschwindigkeiten unterteilt, vgl. Tabelle 6.1. Anhaltspunkt für die Geschwindigkeitswahl war die in DIN 10002-5 festgelegte Dehngeschwindigkeit von $0,2\text{ min}^{-1}$. Darauf basierend wurde je eine Versuchsreihe mit 10-fach erhöhter bzw. erniedrigter Geschwindigkeit gefahren.

Tab. 6.1 Dehngeschwindigkeiten im Warmzugversuch

Versuchsreihe	Dehngeschwindigkeit	
	bis 0,2% Dehnung [min ⁻¹]	ab 0,2% Dehnung [min ⁻¹]
V1	0,005	0,02
V2	0,005	0,20
V3	0,05	2,00

6.3.2 Versuchsaufbau/-durchführung

Die Warmzugversuche wurden in einer Zugprüfmaschine Z250 der Firma Zwick durchgeführt. Im Gegensatz zu den üblichen Rundzugproben wurden die Zugversuche an Flachzugproben $t = 10$ mm (Abb. 6.2) durchgeführt, welche aus den zur Verfügung stehenden Blechen für die Schweißversuche längs zur Walzrichtung entnommen wurden. Das Herausarbeiten der Probenform erfolgte mittels Fräsung. In einem anschließenden Arbeitsschritt wurden die Versuchskörper sandgestrahlt und mit Bornitrid beschichtet. Das Aufbringen der Bornitridschicht ist erforderlich, um eine Verzunderung des Materials durch die Temperaturbeanspruchung im Ofen, verbunden mit vorhandenem Luftsauerstoff, zu verhindern. Dabei wirkt das Bornitrid wie eine Schutzschicht gegen den Luftsauerstoff, ohne dabei die Eigenschaften der Probe zu verändern. Vor dem Einbau des Spiralheizofens (Firma Maytec), musste im Bereich der Durchdringung Gestänge/Ofen, die Probenaufnahme mit Stahl und Steinwolle umwickelt werden, um die Dichtigkeit des Ofens zu erhöhen, siehe Abb. 6.3. Diese Maßnahme war notwendig, um innerhalb des Ofens während des Versuches eine Schutzgasatmosphäre durch das Spülen mit Argon (15 l/min) zu erzeugen. Ziel war auch hier die Reduktion des Luftsauerstoffs zur Vermeidung der Oxidbildung an der Probenoberfläche, wobei durch die Stahlwolle eintretender Luftsauerstoff an der Oberfläche der Stahlwolle als Oxid gebunden wurde. Wichtig beim Einbau der Stahl- bzw. Steinwolle war, eine ausreichende

Abb. 6.2 Probengeometrie Warmzugprobe, Blechstärke $t=10$ mm, S355 J2 G3

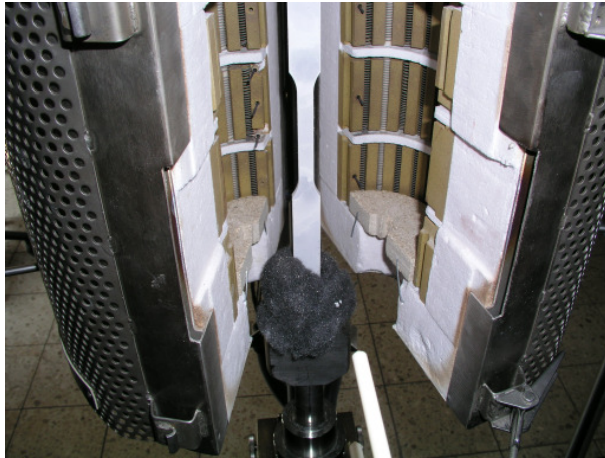


Abb. 6.3 Spiralheizofen mit eingebauter Probe und Abdichtung

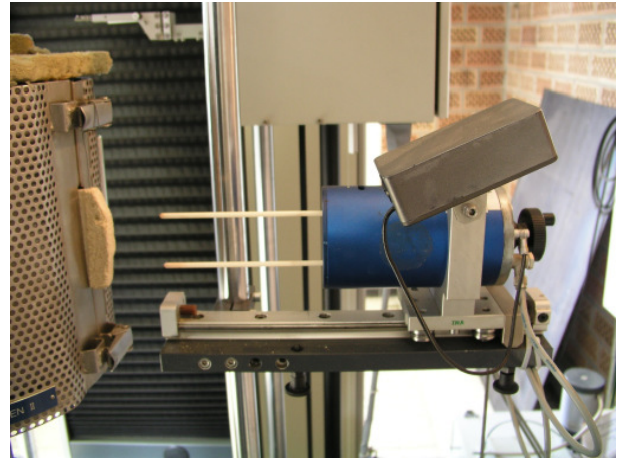


Abb. 6.4 Extensometer mit Ofen

Dichtigkeit zu erzielen, ohne dass eine Kraft auf das Zuggestänge der Prüfmaschine ausgeübt wurde, wodurch es zu einer Verfälschung der gemessenen Kräfte gekommen wäre. Die Dehnungsaufnahme erfolgte mittels wassergekühltem Extensometer, siehe Abb. 6.4. Der zum Aufheizen der Proben eingesetzte Spiralheizofen ermöglichte eine Aufheizgeschwindigkeit von 30 K/min. Hierzu ist festzustellen, dass diese Aufheizgeschwindigkeit nicht der beim Schweißprozess entspricht. Auswirkungen auf das Gefüge, wie z.B. Kornwachstum, sind daher im oberen Temperaturbereich nicht zu vermeiden.

6.3.3 Spannungs-Dehnungs-Verläufe

Aus den während der Warmzugversuche aufgezeichneten Messdaten konnten die temperatur- und dehngeschwindigkeitsabhängigen Spannungs-Dehnungs-Verläufe für einen Baustahl S355J2G3 bestimmt werden. Abb. 6.5 zeigt exemplarisch die perspektivisch dargestellten Spannungs-Dehnungs-Verläufe für eine Dehngeschwindigkeit von $0,02 \text{ min}^{-1}$. Eine tabellarische Auflistung der Wertepaare zur Abbildung der Einzelkurven kann, für alle durchgeführten Versuche, der Anlage entnommen werden. Aus der Grafik ist ersichtlich, dass die Verläufe in Form und Größe unterschiedliche Ausprägungen besitzen. Bis zu einer Temperatur von 300 °C kommt es zu einem Rückgang der Ausbildung des für einen Baustahl dieser Güte typischen Fließplateaus. Streckgrenze und Zugfestigkeit weisen im Temperaturbereich von 400 bis 800 °C einen starken Abfall auf. Der Bruchdehnungsverlauf zeigt keine temperaturabhängige Kontinuität, vielmehr kommt es zur Ausbildung von Bereichen großer Bruchdehnungen, die von Bereichen eines starken Abfalls der Duktilität unterbrochen werden. Beispielhaft ist hier der Bereich um 950 °C zu nennen, der auf eine Versprödung durch Heißrissigkeit infolge niedrigschmelzender Verbindungen auf den Korngrenzen hindeutet. Die Spannungs-Dehnungs-Verläufe im Temperaturbereich zwischen 200 bis 400 °C zeichnen sich durch einen gezackten Anstieg im Verfestigungsbereich aus, wohingegen die übrigen Diagramme einen nahezu stetigen Verlauf aufweisen.

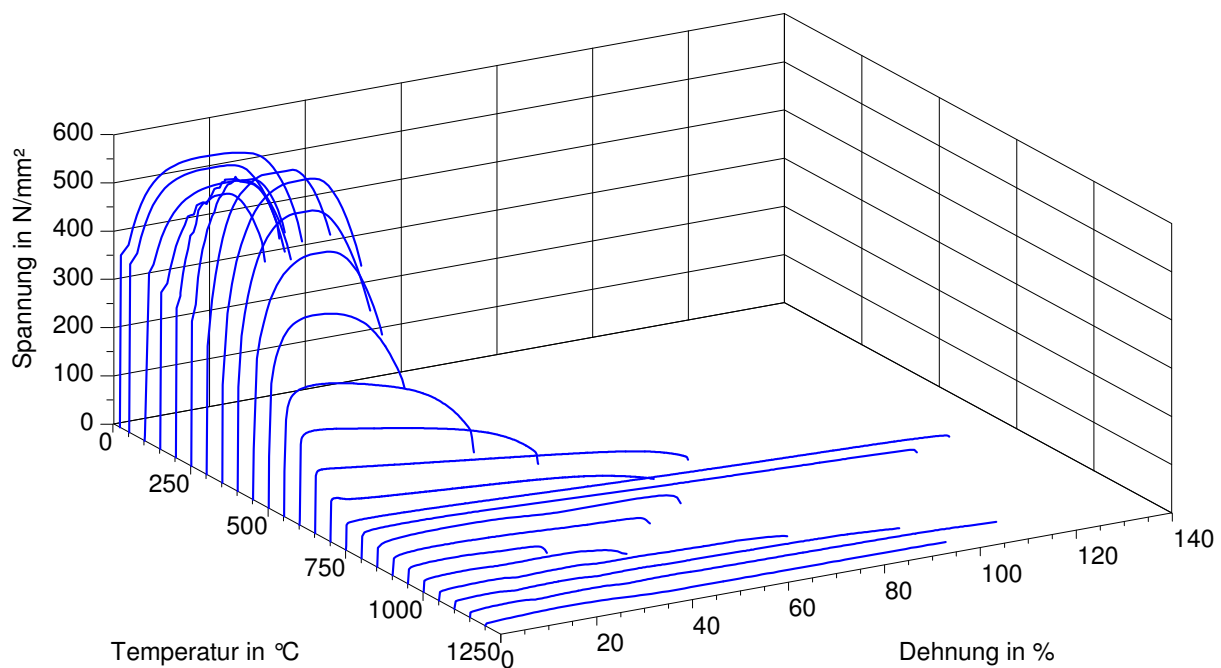


Abb. 6.5 Spannungs-Dehnungs-Verläufe für einen S355 J2 G3 im Temperaturbereich von 20 bis 1200 °C bei einer Dehngeschwindigkeit von $0,02 \text{ min}^{-1}$

Wie aus der Abb. 6.6 ersichtlich, kommt es bei allen drei Dehngeschwindigkeiten zu einem Anstieg der Zugfestigkeit im Bereich von 200 bis 400 °C. Dieser Effekt wird in der Literatur als „Dynamische Reckalterung“ beschrieben und ist nach KALWA [1993] typisch im Temperaturbereich von 100 bis 400 °C. Nach dem Erreichen des Maximums fällt die Zugfestigkeit im Temperaturbereich von 450 bis 800 °C rapide ab und geht in einen leicht abfallenden Ast über. Deutlich zu erkennen ist das von BÖTTCHER [2002] beschriebene Werkstoffverhalten einer Erhöhung der Zugfestigkeit mit zunehmender Dehngeschwindigkeit. Dieser Effekt konnte sowohl bei Raumtemperatur als in Bereichen über 400 °C beobachtet werden.

Abb. 6.7 stellt den Verlauf der Streckgrenze über die Temperatur dar. Im Gegensatz zur Zugfestigkeit ist der Anstieg der Streckgrenze infolge erhöhter Dehngeschwindigkeit nicht so stark ausgeprägt. Der wesentliche Unterschied ist in einem kontinuierlichen Abfall der Festigkeit zu sehen. Eine Erhöhung der Festigkeitswerte im Bereich von 200 bis 400 °C ist nicht vorhanden, jedoch kann der steilste Festigkeitsabfall auch hier im Bereich von 400 bis 800 °C beobachtet werden.

Der E-Modul ist die mit Abstand am schwierigsten zu bestimmende Größe, was sich auch im zackigen Verlauf der Kurve widerspiegelt, vgl. Abb. 6.8. Analog zur Zugfestigkeit und Streckgrenze kann auch hier eine Erhöhung der Werte mit steigender Dehngeschwindigkeit beobachtet werden. Der Steilabfall des E-Moduls liegt im Bereich von 400 bis 800 °C. Wenn der E-Modul auch einer gewissen Schwankungsbreite unterliegt, so kann doch eine klare Tendenz des Verhaltens über die Temperatur ausgemacht werden.

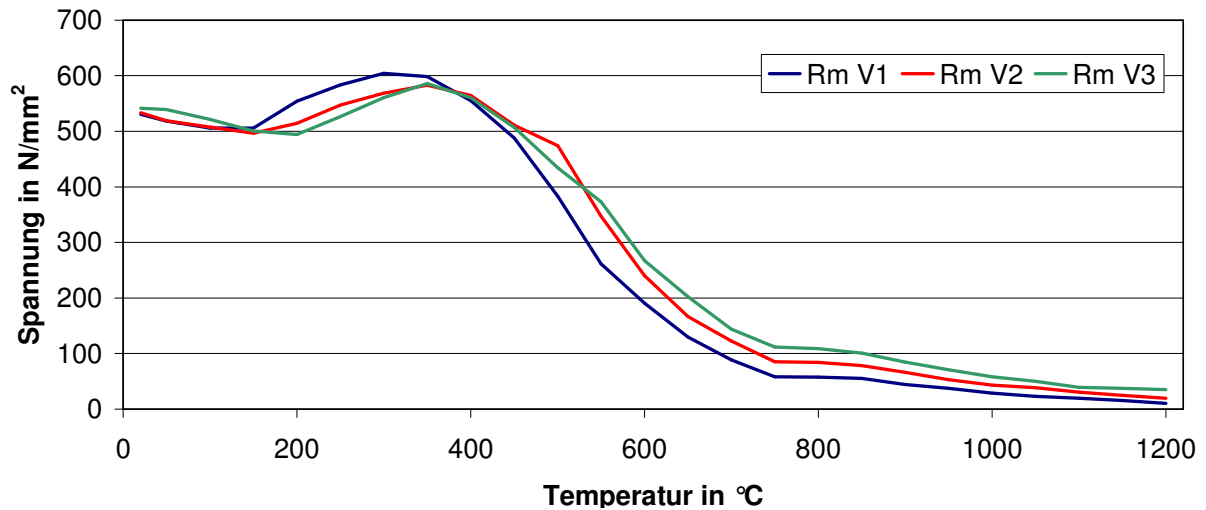


Abb. 6.6 Verlauf der Zugfestigkeiten über die Temperatur

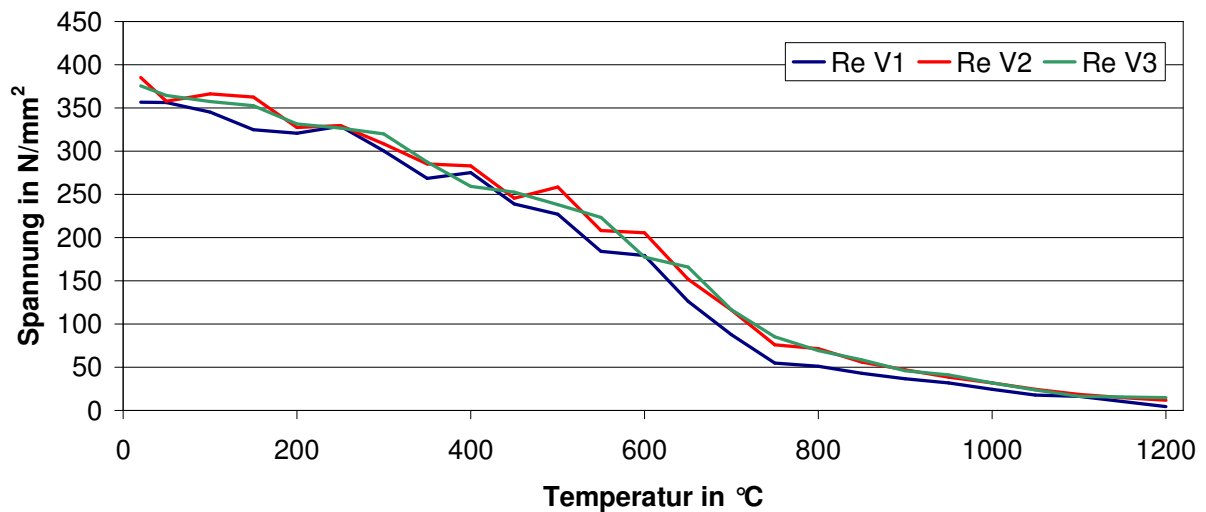


Abb. 6.7 Verlauf der Streckgrenzen über die Temperatur

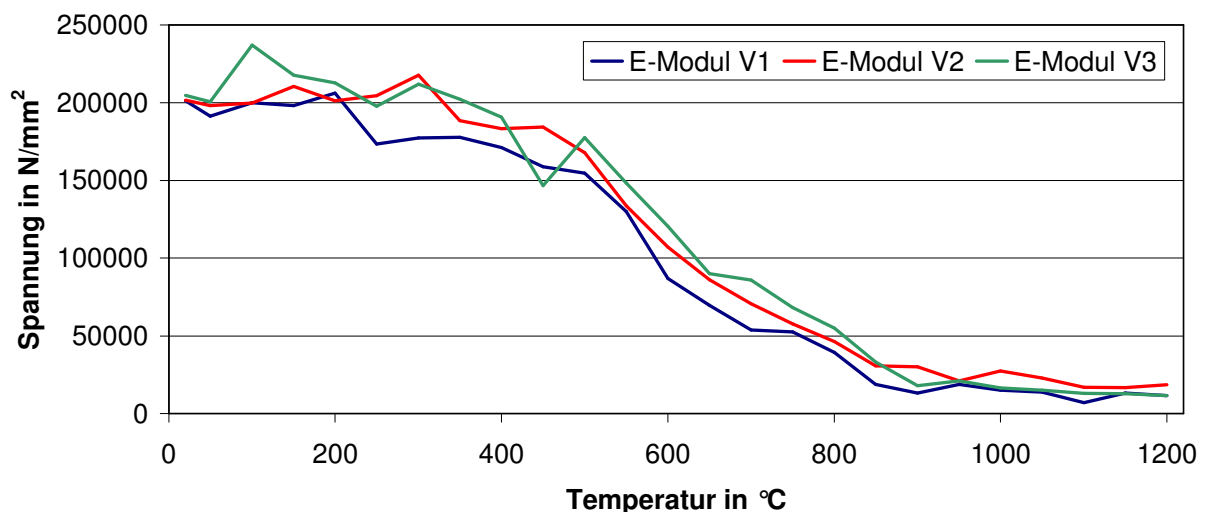


Abb. 6.8 Verlauf der E-Moduli über die Temperatur

Eine Betrachtung der Bruchdehnungsverläufe über die Temperatur zeigt zunächst ein gegenläufiges Verhalten zur Zugfestigkeitsentwicklung. Wie aus der Abb. 6.9 zu erkennen, kommt es bis zu einer Temperatur von 200 °C zu einem leichten Rückgang der Bruchdehnung. Mit Temperatur über 300 °C verringert sich die Festigkeit des Werkstoffes (Abb. 6.6 bis 6.8), die Bruchdehnung steigt überproportional an. Nach dem Erreichen eines Maximums bei rd. 800 °C fällt die Bruchdehnung signifikant ab und erreicht bei 950 °C einen Tiefpunkt. Oberhalb von 1000 °C steigt die Bruchdehnung erneut an und erreicht gegen Ende des untersuchten Temperaturbereiches erneut ein Maximum.

Das beschriebene Werkstoffverhalten spiegelt sich auch in der Bruchform der Warmzugproben wieder, siehe Abb. 6.10. Der anfängliche Mischbruch aus Trenn- und Verformungsbruch (*cup and cone*) geht mit zunehmender Temperatur in einen Verformungsbruch über, vgl. WEIß [2000]. Im Bereich des stärksten Rückgangs der Bruchdehnung (950 °C) weisen die Zugproben ein Sprödbbruch ähnliches Versagen auf, zu erkennen am Trennbruch entlang der Korngrenzen. Mit steigender Temperatur verliert sich dieses Bruchverhalten rasch und das Bruchbild stellt sich zunehmend als Verformungsbruch dar. Bei 1200 °C liegt ein reiner Verformungsbruch vor. Die Bruchkante ist spitz zulaufend. Anteile eines Trennbruches sind nicht mehr erkennbar.

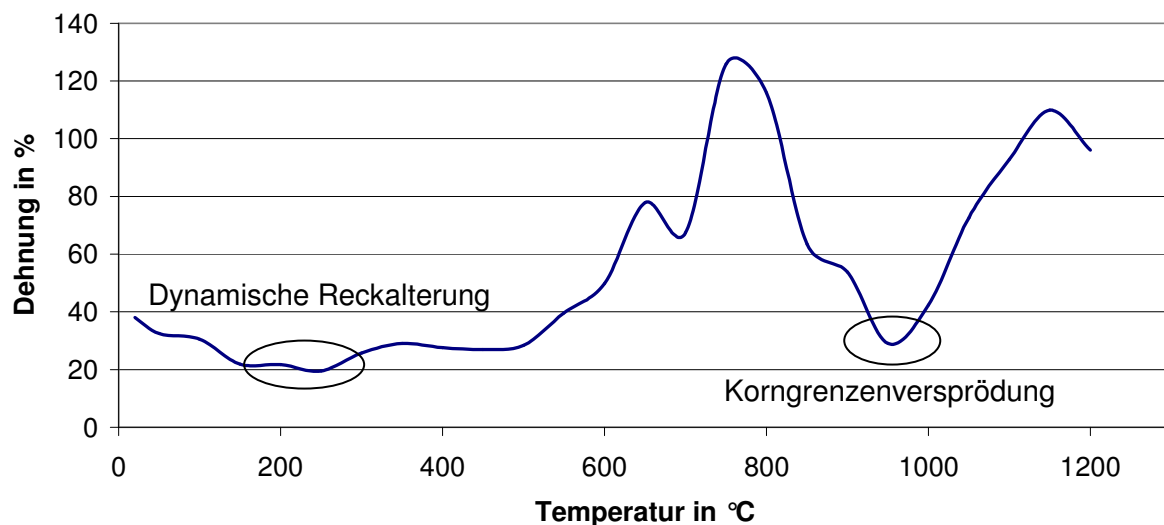


Abb. 6.9 Verlauf der Bruchdehnung über die Temperatur unter einer Dehngeschwindigkeit V_1

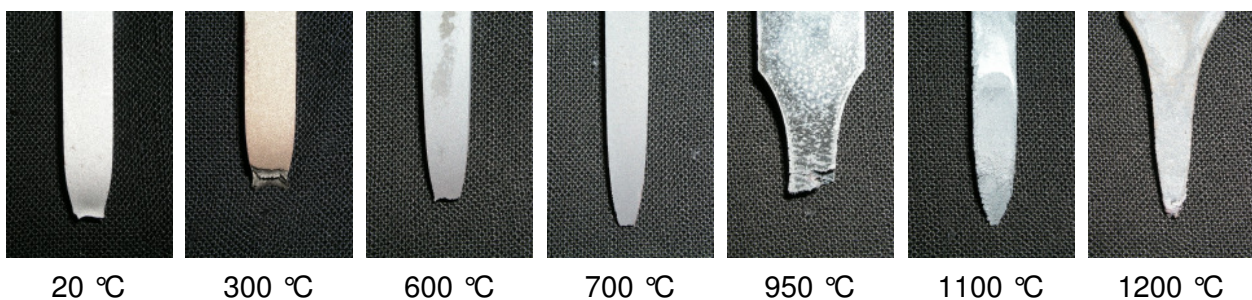


Abb. 6.10 Bruchformen der Warmzugproben im Temperaturbereich von RT bis 1200 °C

6.3.4 Effekte in Abhängigkeit der Temperatur

Im Temperaturbereich von 200 bis 400 °C weisen die aufgenommenen Spannungs-Dehnungs-Diagramme einen unstetigen, gezackten Verlauf auf. Abb. 6.11 zeigt exemplarisch eine unter einer Dehnungsgeschwindigkeit von $0,02 \text{ min}^{-1}$ und 300 °C aufgenommene Spannungs-Dehnungs-Kurve. Parallel zum Auftreten dieses „unstetigen“ Verlaufs verringert sich die Bruchdehnung, vgl. Abb. 6.9. Dieser sich darstellende Effekt („zackiger“ Verlauf, Rückgang der Bruchdehnung) wird als „*Dynamische Reckalterung*“ bezeichnet und ist ein typisches Verhalten für Baustähle unter erhöhten Temperaturen bis 400 °C (Kalwa [1993], Haas [1994], Horn [2001], Gott [2001]). Die im Werkstoff ablaufenden Vorgänge ähneln dabei denen der statischen Reckalterung, wobei sich zwei Mechanismen unterscheiden lassen. Interstitiell gelöste Kohlenstoff- und Stickstoffatome lagern sich bevorzugt, aufgrund der energetisch günstigeren Lage, im Spannungsfeld einer Versetzung an (*Cottrell-Wolke*). Durch diese Umklammerung wird die Versetzung an ihrer Bewegung behindert, was zu einer Verfestigung bei gleichzeitiger Versprödung des Werkstoffes führt. Beim *Snoek-Effekt* nehmen die interstitiell gelösten Fremdatome die Oktaeder-Plätze des krz-Gitters im α -Eisen ein, wobei sich die Fremdatome gleichmäßig auf den Raumachsen des Gitters verteilen. Aufgrund der Größe der Fremdatome kommt es zu einer Verzerrung des Gitters, da diese mehr Platz benötigen, als ihnen in den Oktaederlücken zur Verfügung steht. Wird das Gitter z.B. in z-Richtung elastisch gedehnt, kommt es in x- und y-Richtung infolge der Querkontraktion zu einer Stauchung. Für die Fremdatome stellen jetzt die in der z-Achse orientierten Gitterplätze

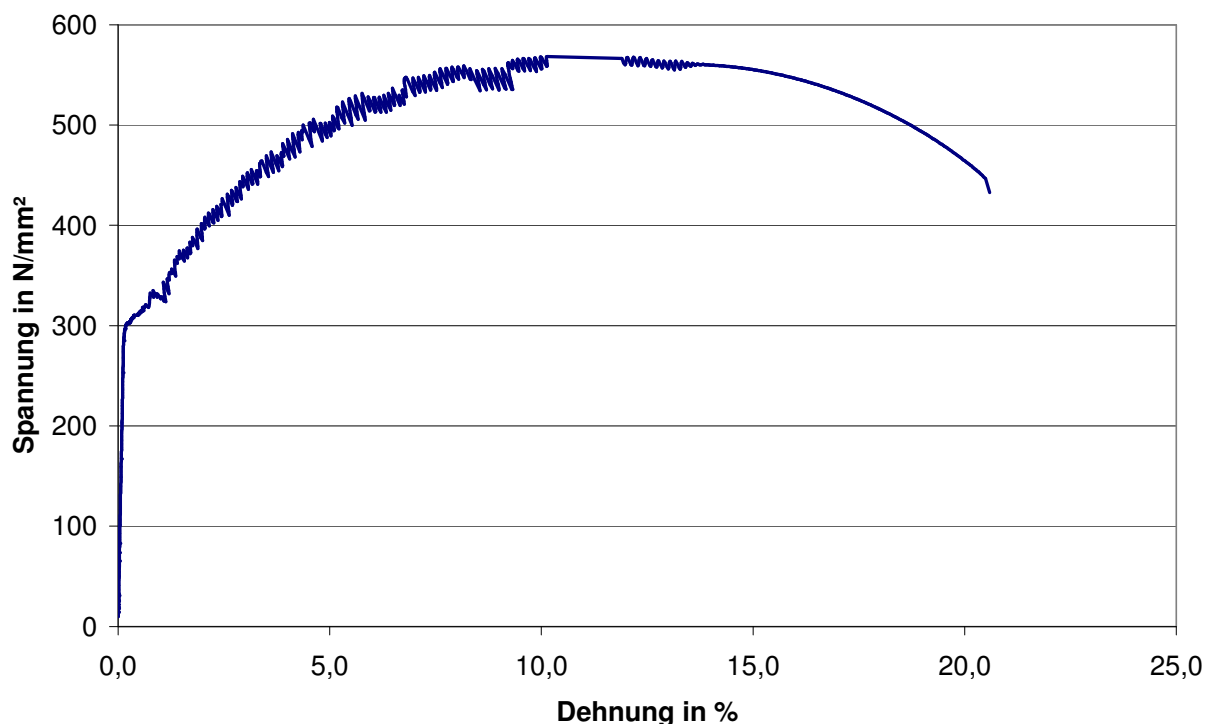


Abb. 6.11 Spannungs-Dehnungs-Verlauf im Bereich der dynamischen Reckalterung unter einer Dehngeschwindigkeit von $0,02 \text{ mm}^{-1}$ und 300 °C

die energetisch günstigste Lage dar, wodurch es zu Platzwechseln auf die z-achsenorientierten Zwischengitterplätze kommt. Dieser Vorgang läuft auch im elastischen Feld einer Versetzung ab, was zu einer bevorzugten Anlagerung der Fremdatome an die Versetzung führt. Nach ROSINGER [1975] treten die beschriebenen Vorgänge zeitlich nacheinander auf, wobei der Alterungsvorgang durch den *Snoek-Effekt* eingeleitet wird, da die Sprungwege kürzer sind als die Diffusionswege der Fremdatomwolken. Um eine Bewegung der Versetzung zu ermöglichen, muss diese sich zunächst von der „Umklammerung“ der Fremdatomwolke losreißen, was jedoch einer höheren Spannung bedarf. Mit zunehmender Anzahl von „freien“ Versetzung, welche sich von den *Cottrell-Wolken* gelöst haben, sinkt die aufzubringende Spannung wieder ab. Dieser Effekt ist klassisch beim Vorhandensein einer oberen und unteren Streckgrenze. Im Temperaturbereich der dynamischen Reckalterung besitzen die Fremdatome neben der Möglichkeit, die Versetzungen zu blockieren, eine erhöhte Diffusionsfähigkeit. Diese ist so groß, dass eine Ansammlung der Fremdatome um die Versetzungen während der Verformung möglich ist. Die Versetzungen werden somit erneut von den Fremdatomen eingefangen, was in der Folge zu einer Spannungserhöhung führt, da die Versetzungsbewegung behindert wird. Aus Abb. 6.11 ist ersichtlich, dass es mit zunehmender Lastaufbringung zu einem Wechselspiel zwischen Festsetzung und Losreißen der Versetzungen kommt (*Portevin-Le Chatelier-Effekt*). Die durch den Vorgang der dynamischen Reckalterung abnehmende Zähigkeit wird auch als *Blausprödigkeit* bezeichnet.

Im Temperaturbereich um 950 °C kommt es zu einer Versprödung des Werkstoffes, deutlich zu erkennen am Rückgang der Bruchdehnung in Abb. 6.9. Eine genauere Untersuchung der Warmzugproben zeigt eine interkristalline Rissstruktur (Abb. 6.12) sowie das Vorhandensein von Mangansulfid auf den Korngrenzen (Abb. 6.13). Als ursächlich für den Duktilitätsabfall kann eine auftretende *Korngrenzenversprödung* (Heißbrissigkeit) des untersuchten Materials angesehen werden. Vorhandene niedrigschmelzende Legierungsbestandteile, wie z.B. das bei 988 °C erstarrende Eisen-Schwefel-Eutektikum, bilden einen Flüssigkeitsfilm auf den Korngrenzen, welcher eine Kraftüber-

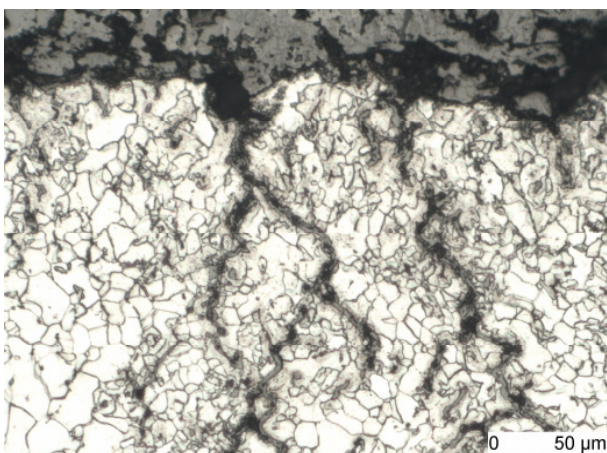


Abb. 6.12 Gefügestruktur einer Warmzugprobe 950 °C, interkristalline Rissbildung

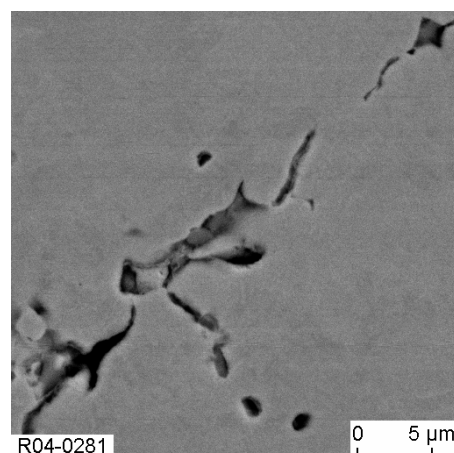


Abb. 6.13 Mangansulfid auf den Korngrenzen einer Warmzugprobe 950 °C

tragung zwischen den einzelnen Körnern verhindert. Begünstigt wird dieser Effekt durch das einsetzende Kornwachstum infolge der Wärmebehandlung beim Warmzugversuch, wodurch die vorhandenen Verunreinigungen sich auf einer kleineren Fläche konzentrieren.

Im Hochtemperaturbereich beeinflussen *dynamische Erholungs- und Rekristallisationsvorgänge* den Verlauf des Spannungs-Dehnungs-Diagramms in charakteristischer Weise, vgl. Lang [1984]. Diese Vorgänge spiegeln sich auch in den aufgenommenen Spannungs-Dehnungs-Kurven wider. Abb. 6.14 zeigt eine im Hochtemperaturbereich aufgenommene Spannungs-Dehnungs-Kurve. Deutlich erkennbar ist das wellenartige Ausschlagen der Kurve, welches auf dynamische Erholungs- und Rekristallisationsvorgänge hindeutet. Die dynamische Rekristallisation definiert sich als eine Gefügeneubildung noch während des Verformungsprozesses. Es handelt sich dabei um einen entfestigenden Prozess, welcher der Erhöhung der Versetzungsdichte infolge der Umformung, beim Zugversuch der Längsdehnung, entgegenwirkt. Voraussetzung für die dynamische Rekristallisation ist ein ausreichend hoher Umformgrad sowie thermische Aktivierung, um den Prozess der Gefügeneubildung zu starten. Die dynamische Rekristallisation und auch die dynamische Erholung führen dazu, dass bei der Warmumformung der Probe im Zugversuch die Fließspannung gering bleibt und aufgrund der gestiegenen Duktilität ein hoher Umformgrad erreicht werden kann. Dieser Sachverhalt zeigt sich in dem verstärkten Anstieg der Bruchdehnung, vgl. Abb. 6.9. Triebkraft für die dynamische Rekristallisation ist vor allem der Unterschied in der Versetzungsdichte zwischen dem umgeformten und dem neu gebildeten Korn.

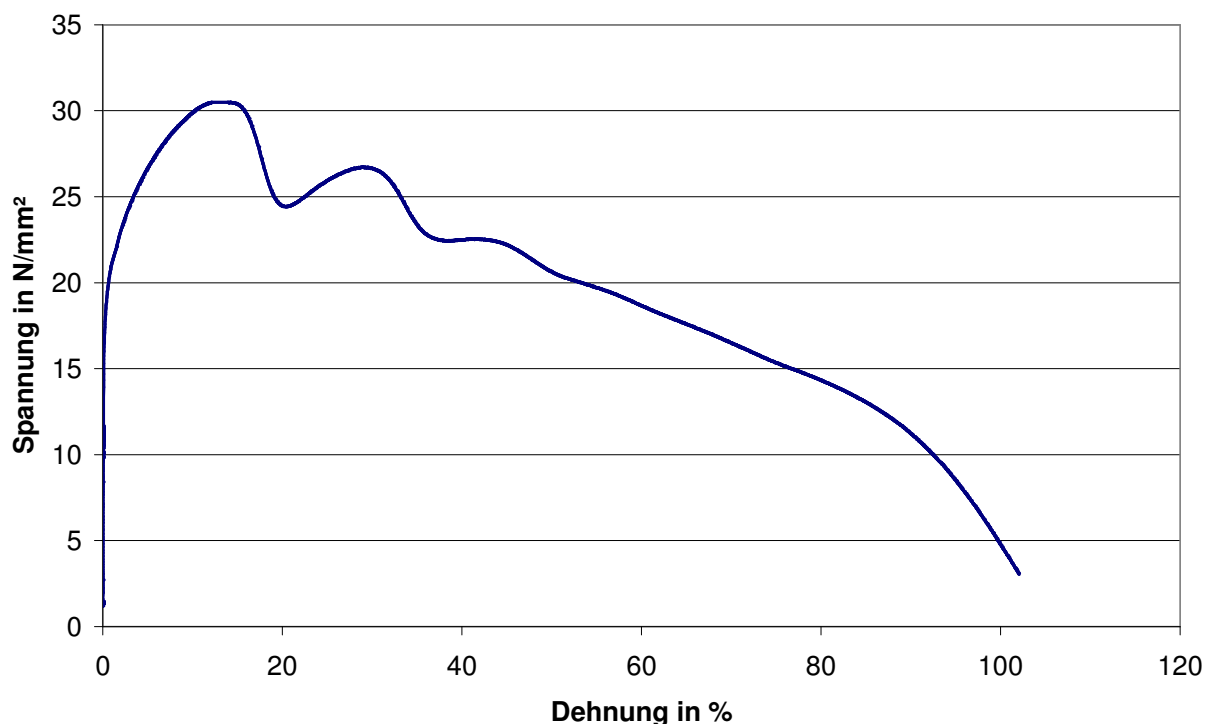


Abb. 6.14 Spannungs-Dehnungs-Verlauf im Bereich der dynamischen Rekristallisation für eine Warmzugprobe 1100 °C, Dehnungsgeschwindigkeit 0,20 mm⁻¹

6.4 Elastizitäts- und Schubmodul

Die Bestimmung der elastomechanischen Kennwerte stellt sich gerade im Hochtemperaturbereich als eine der schwierigeren Messaufgaben heraus. Deutlich erkennbar ist dies bei der Betrachtung der in Kapitel 6.3.3 vorgestellten Ergebnisse aus den durchgeführten Warmzugversuchen, vgl. auch PEIL und WICHERS [2004]. Die Bestimmung des Verlaufs der E-Moduli über die Temperatur, basierend auf den Messergebnissen der Zugversuche im Temperaturbereich von RT bis 1200 °C, zeigt bei einer gewissen Streubreite das phänomenologische Verhalten, jedoch erscheinen quantitative Aussagen hinsichtlich des E-Moduls mit einer Unsicherheit behaftet, vgl. Abb. 6.8. Es ist daher sinnvoll, die Ermittlung der elastomechanischen Kennwerte, E- und G-Modul, mit anderen Verfahren zur überprüfen.

Ein alternatives Messverfahren zur Bestimmung der elastomechanischen Kennwerte nutzt die physikalischen Beziehungen zwischen Eigenfrequenz, Schallgeschwindigkeit und E- bzw. G-Modul. Mittels eines Frequenzgenerators werden piezoelektrische Kristalle zu mechanischen Schwingungen angeregt, die diese stirnseitig auf einen Probenstab des zu untersuchenden Materials übertragen. Auf der gegenüberliegenden Seite des Prüfkörpers werden die Schwingungen von einem angekoppelten piezoelektrischen Kristall registriert und in eine elektrische Spannung umgewandelt, deren Frequenz gleich der Schwingungsfrequenz und deren Amplitude proportional der Schwingungsamplitude des Prüfkörpers ist. Die Frequenz wird dabei solange variiert, bis die Probe sich in Resonanz befindet. Mittels der gemessenen Resonanzfrequenz kann abschließend auf die elastomechanischen Kennwerte geschlossen werden.

Die Messung der dynamisch elastischen Konstanten Elastizitätsmodul und Schubmodul wurden unter Verwendung eines Elastomaten 1.024 der Fa. Institut Dr. Förster, Reutlingen, durchgeführt. Abb. 6.15 zeigt den Versuchsaufbau. Untersucht wurden Rundproben $\varnothing 8,5 \times 130$ mm im Temperaturbereich von 25 bis 900 °C. Die Proben wurden freihängend an zwei dünnen Platindrähten am Ausgleichskörper des Ofens befestigt, wobei die Aufhängungen der Probe so verschoben wurden, dass der Probenstab immer im Knotenpunkt der Grundwelle liegt. Die Abb. 6.16 zeigt die einge-



Abb. 6.15 Elastomat 1.024 mit Ofen

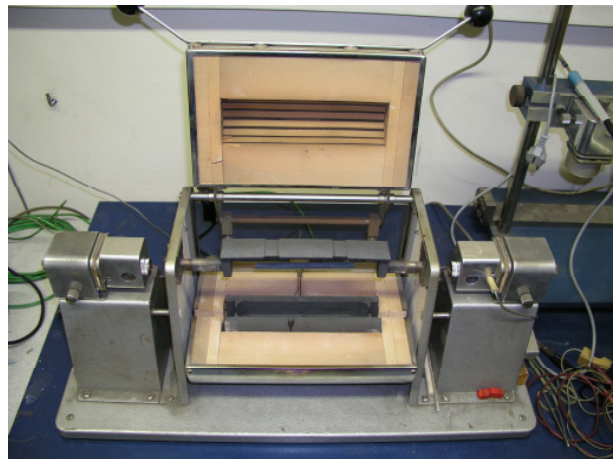


Abb. 6.16 Ofen mit eingehängter Probe

baute Probe vor dem Verschließen des Spiralheizofens. Der Piezokristall ist an dünnen Fäden pendelnd aufgehängt, so dass die Kristallsysteme der Wärmedehnung des zu untersuchenden Prüfkörpers folgen können, ohne dass dadurch die Ankopplungsbedingungen verändert werden. Die Ankopplung selbst erfolgt durch Erreger- und Empfangsdrähtchen.

6.4.1 Theoretische Grundlagen

Zum besseren Verständnis des Messprinzips werden nachstehend die wichtigsten Zusammenhänge zwischen Eigenfrequenz, Schallgeschwindigkeit und E- bzw. G-Modul kurz dargestellt. Eine ausführliche Darstellung ist FÖRS [1992] zu entnehmen.

Für die Ausbreitung einer Schallwelle in einem Medium gilt:

$$v = f \cdot \lambda \quad (6.1)$$

v : Schallgeschwindigkeit im Medium
 f : Frequenz der Schwingung
 λ : Wellenlänge der Schwingung im Medium

Eine Resonanz tritt aus, wenn die Prüfkörperlänge gleich einem ganzzahligen Vielfachen der halben Wellenlänge entspricht, vgl. Abb. 6.17.

Für die Probenlänge l ergibt sich somit:

$$l = p \cdot \frac{1}{2} \lambda \quad (6.2)$$

Dabei ist p die Ordnungszahl der Schwingung. Durch Einsetzen von Gl. (6.2) in Gl. (6.1) und dem Auflösen nach der Frequenz f_p ergibt sich:

$$f_p = \frac{p \cdot v}{2 \cdot l} \quad (6.3)$$

Für die Bestimmung des E-Moduls wird die Longitudinal-Schwingung herangezogen, für den Schubmodul die Torsional-Schwingung. Der Zusammenhang zwischen E-Modul und Schallgeschwindigkeit in longitudinaler Richtung v_{long} ist gegeben durch die nachstehende Beziehung, wobei ρ die Dichte des Werkstoffes ist.

$$v_{long} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (6.4)$$

Durch Einsetzen von Gl. (6.4) in Gl. (6.3) und auflösen nach dem E-Modul, ergibt sich:

$$E = \frac{4 \cdot l^2 \cdot \rho}{p^2} \cdot (f_p^{long})^2 \quad (6.5)$$

Analog ergibt sich aus der Beziehung der Gl. (86.6) die Herleitung für den Schubmodul.

$$v_{tors} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (6.6)$$

$$G = \frac{4 \cdot l^2 \cdot \rho}{p^2} \cdot (f_p^{tors})^2 \quad (6.7)$$

Sowohl in Gl. (6.3) als auch in Gl. (6.6) kommt der Durchmesser des Probenstabes nicht vor, wodurch die torsionale Eigenfrequenz des Stabes unabhängig von seinem Durchmesser ist. Daraus folgt, dass Stäbe gleicher Länge und aus gleichem Werkstoff unabhängig von ihrem Durchmesser dieselbe Eigenfrequenz aufweisen.

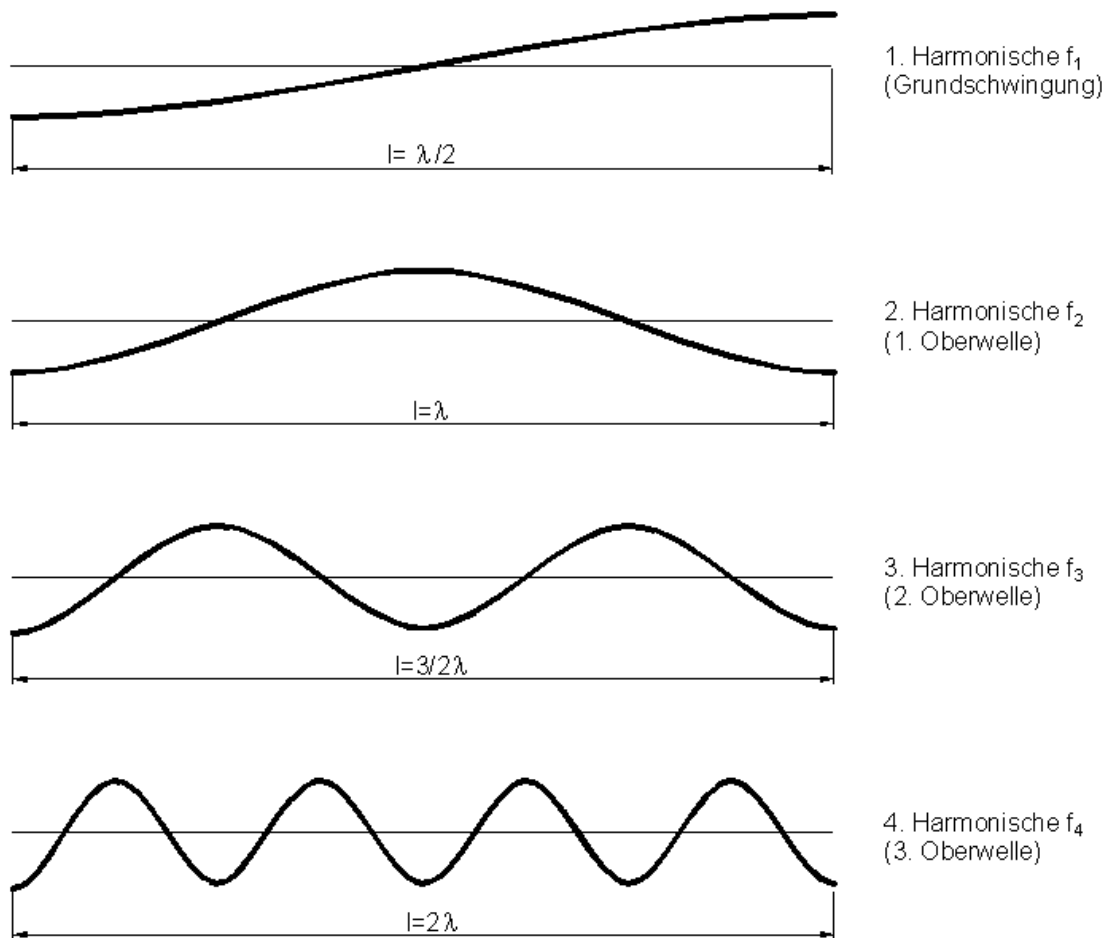


Abb. 6.17 Resonanzbedingungen zur Bestimmung der dynamisch, elastomechanischen Kennwerte

6.4.2 Dynamischer Elastizitätsmodul

Wie bereits dargelegt, ist die Bestimmung des E-Moduls anhand von Zugversuchen im Hochtemperaturbereich nicht unproblematisch. Tendenzen und Abhängigkeiten von z.B. der Dehngeschwindigkeit können aufgezeigt werden, jedoch muss eine quantitative Aussage kritisch betrachtet werden, vgl. PEIL und WICHERS [2004]. Die alternative Bestimmung des Elastizitätsmoduls mittels des eingesetzten akustischen Resonanzverfahrens liefert den in Abb. 6.18 dargestellten Verlauf. Auf eine Darstellung der Wertepaare wird an dieser Stelle verzichtet und auf die Anlage verwiesen. Ein Vergleich der ermittelten Werte mit den Ergebnissen der Warmzugversuche zeigt im Temperaturbereich bis 550 °C eine sehr gute Übereinstimmung. Ab rd. 600 °C kommt es zu einem divergenten Verhalten. Die anhand des „klassischen Warmzugversuch“ bestimmten Ergebnisse weisen einen wesentlich steileren Werteabfall auf als die durch das akustische Resonanzverfahren ermittelten Werte, welche erst ab rd. 800 °C in einen steileren Abfall übergehen. Eine genaue Erklärung des Unterschieds scheint zum jetzigen Zeitpunkt nur bedingt möglich. Im Temperaturgebiet um 800 °C erstreckt sich die Grenze der Phasenumwandlung zwischen Ferrit und Austenit. Mit Eintritt ins Austenitgebiet liegt der Stahl im kfz-Gitter vor, welches sich aufgrund seiner höheren Packungsdichte und der möglichen Gleitsysteme leichter verformen lässt, damit verbunden ist ebenfalls eine Reduktion des E-Moduls. Im Gegensatz zur Bestimmung des E-Moduls aus einem Zugversuch, bei dem das Gefüge während des Versuches neben der Temperatur eine mechanische Beanspruchung erfährt, bleibt das Gefüge durch das akustische Resonanzverfahren mechanisch beanspruchungsfrei. Effekte wie z.B. das Entstehen von Verset-

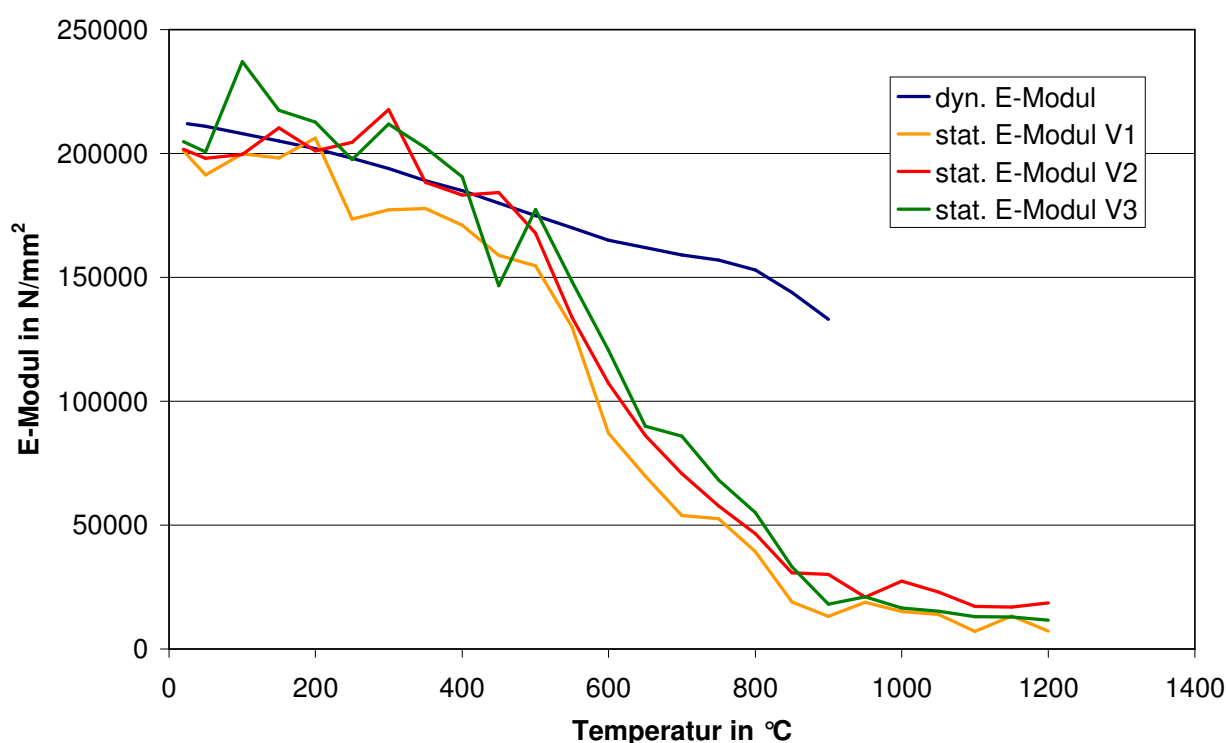


Abb. 6.18 Vergleich und Verlauf der statischen und dynamischen E-Moduli über die Temperatur

zungen oder Gitterverspannungen infolge der Lasteinwirkung liegen nicht vor und haben somit keine Auswirkungen auf das Ergebnis. An dieser Stelle kann zu Recht die Frage gestellt werden, welcher E-Modul der „Richtige“ ist. Hierzu lässt sich jedoch die Überlegung anstellen, dass in einem realen Bauteil eine Beanspruchung wirkt und somit das Bauteil nicht lastfrei vorliegt, daher dürften für eine Steifigkeitsbetrachtung die E-Moduli aus den Warmzugversuch realistischere Werte liefern, die zumindest hinsichtlich auftretender Verformungen auf der „sicheren Seite“ liegen.

6.4.3 Dynamischer Schubmodul

Analog zur Bestimmung des dynamischen E-Moduls erfolgte die Ermittlung des dynamischen Schubmoduls mittels des akustischen Resonanzverfahrens. Abb. 6.19 zeigt den Verlauf des dynamischen Schubmoduls. Ein Vergleich mit „konventionell“ bestimmten Werten ist aufgrund fehlender Daten nicht möglich, jedoch liegen die Werte innerhalb des Streubandes, welches von RICHTER [1974] bis 600 °C bestimmt worden ist. Bemerkenswert ist das zunehmende Absinken der gemessenen Werte ab 700 °C. Ursächlich für den zunehmenden Abfall scheint die Änderung der Gefügestruktur des Werkstoffs oberhalb von 700 °C zu sein. Mit dem Überschreiten der Umwandlungstemperatur wandelt sich der vorhandene Ferrit (krz-Gitter) in Austenit (kfz-Gitter) um. Dieser besitzt eine größere Anzahl an Gleitebenen und weist somit einen geringeren Widerstand gegenüber Verformungen auf.

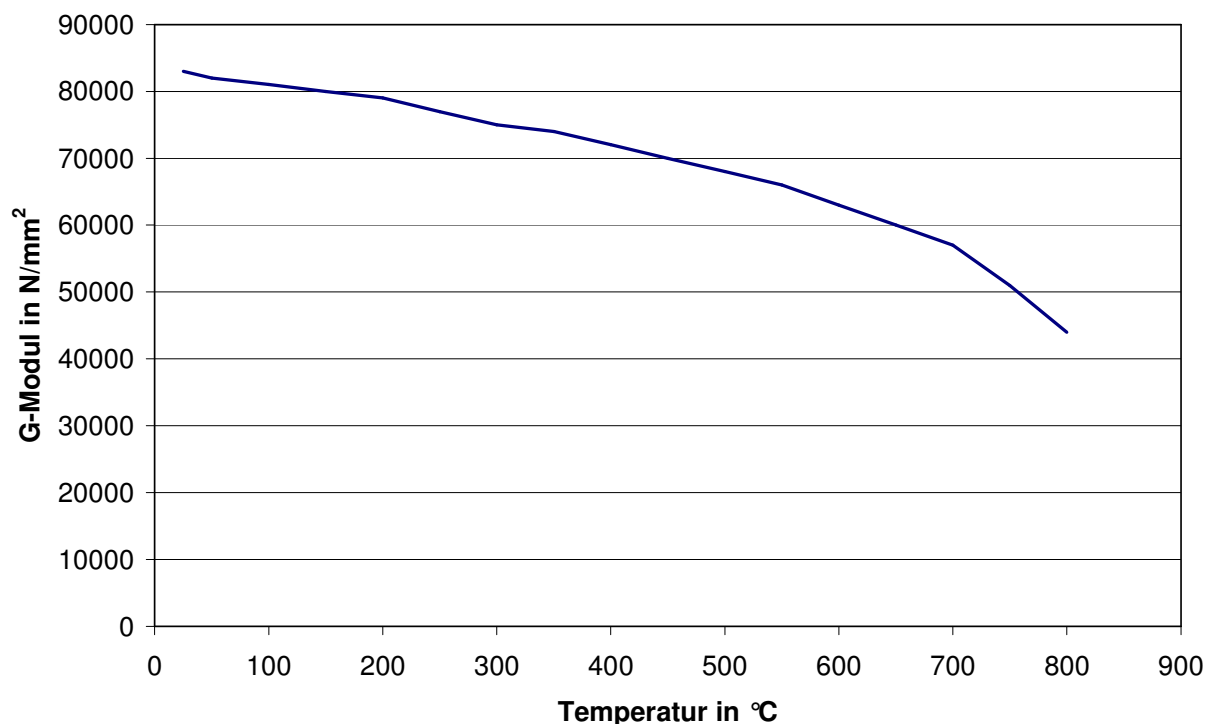


Abb. 6.19 Verlauf des dynamischen Schubmoduls über die Temperatur

6.5 Querkontraktionszahl (*Poisson-Zahl*)

Bei einer einachsigen Verformung metallischer Werkstoffe hat eine Längenzunahme zwangsläufige eine Querschnittsabnahme zur Folge, die als Querkontraktion bezeichnet wird. Das Verhältnis zwischen Quer- zur Längsdehnung wird als Querkontraktionszahl ν oder auch Poisson-Zahl bezeichnet. Zwischen dem Elastizitätsmodul, dem Schubmodul und der Querkontraktionszahl besteht die Beziehung:

$$\nu = \frac{E}{2 \cdot G} - 1 \leq 0,5 \quad (6.8)$$

Die Querkontraktionszahl ist auf Werte kleiner gleich 0,5 begrenzt. Diese Grenzbedingung ergibt sich aus der Forderung, dass eine einachsige Zugbeanspruchung nicht zu einer Volumenverminderung infolge Querdehnung führen kann. Eine Auswertung der Gl. (6.8) unter Einbeziehung der in Abb. 6.18 und 6.19 dargestellten Versuchsdaten liefert den in Abb. 6.20 dargestellten Verlauf. Deutlich zu erkennen ist der steile Anstieg der Querkontraktionszahl im Temperaturbereich ab 700 °C. Die hier ermittelten Werte liegen zum Teil oberhalb von 0,5 und sind unter Berücksichtigung der oben genannten Grenzbedingung nicht zulässig. Inwieweit hier Gefügeumwandlungsvorgänge das Messergebnis des Resonanzverfahrens beeinflusst haben oder ob die Gl. (6.8) im Hochtemperaturbereich noch Gültigkeit besitzt, muss im Zuge weiterer Forschungen geklärt werden. Angaben zu diesem Sachverhalt wurden in der einschlägigen Literatur nicht gefunden.

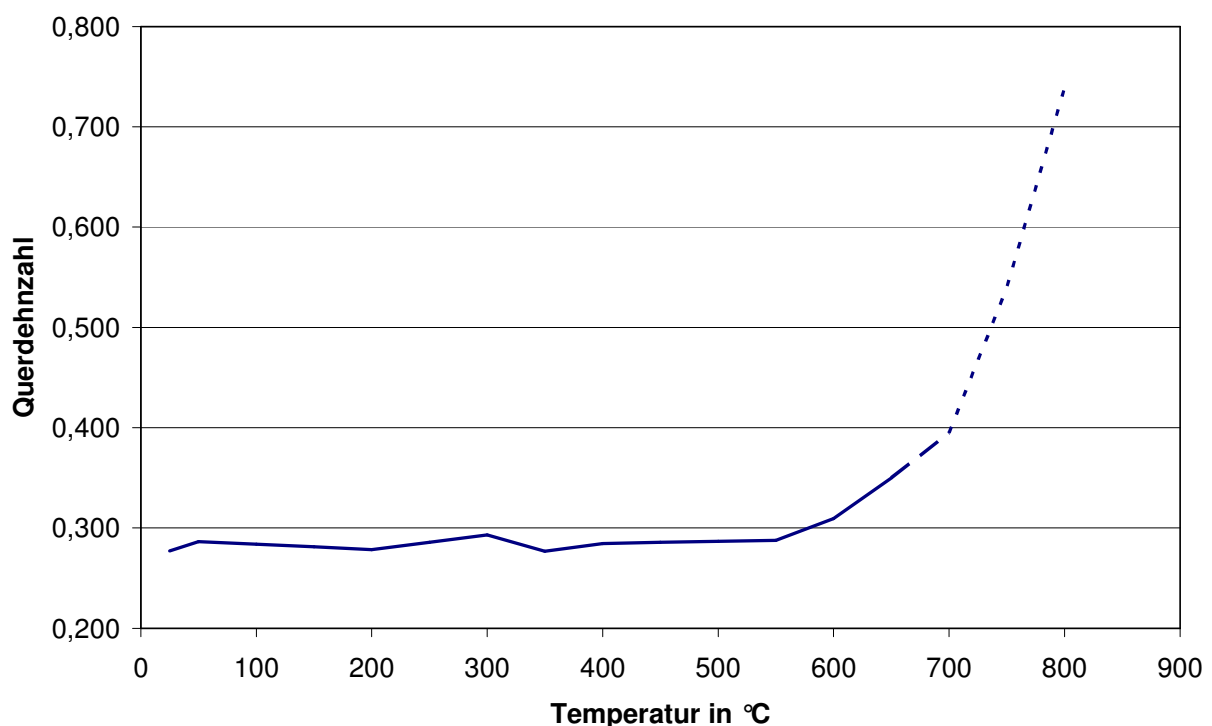


Abb. 6.20 Verlauf der berechneten Querdehnzahl über die Temperatur

6.6 Wärmeausdehnungskoeffizient

Die Bestimmung des Wärmeausdehnungskoeffizienten erfolgte mittels Dilatometermessung bis zu einer Temperatur von rd. 900 °C. Um den Einfluss einer eventuellen Streuung infolge von Werkstoffinhomogenitäten und unterschiedlichen Messapparaturen abzuschätzen, wurden insgesamt drei Messungen mit unterschiedlichen Dilatometern durchgeführt. Die sich aus den Messungen ergebenden Kurven sind in der Abb. 6.21 dargestellt. Eine Auflistung der Messwerte erfolgt im Anhang der Arbeit. Für die Messung wurden zwei kommerzielle, liegend messende Dilatometer der Firma Bähr sowie ein Vertikaldilatometer (Eigenentwicklung) verwendet. Die technischen Spezifikationen sind der Tab. 6.2 zu entnehmen, vgl. Peil und Wichers [2004,2005a]. Der temperaturabhängige Verlauf des Wärmeausdehnungskoeffizienten lässt deutlich das allotrope Werkstoffverhalten des Baustahls mit der Gefügewandlung (Ferrit/Austenit) im Bereich von 750 bis 850 °C erkennen. Ein Vergleich der Messergebnisse zeigt, dass die Messung des Wärmeausdehnungskoeffizienten einer systematischen Streuung unterliegt, wobei das Temperaturband der Gefügewandlung nahezu identisch ist.

Tab. 6.2 Kennwerte der Dilatometermessung und technische Spezifikationen

		Geräte		
		Bähr DIL802®	Bähr DIL804®	Vertikaldil.
Anfangsmesslänge	mm	49,97	9,98	26,00
Durchmesser	mm	5,00	5,00	6,00
Messsystem		Quarz	Quarz	Quarz
Atmosphäre		Vakuum	Vakuum	Vakuum
Bezugstemperatur	°C	25	25	20

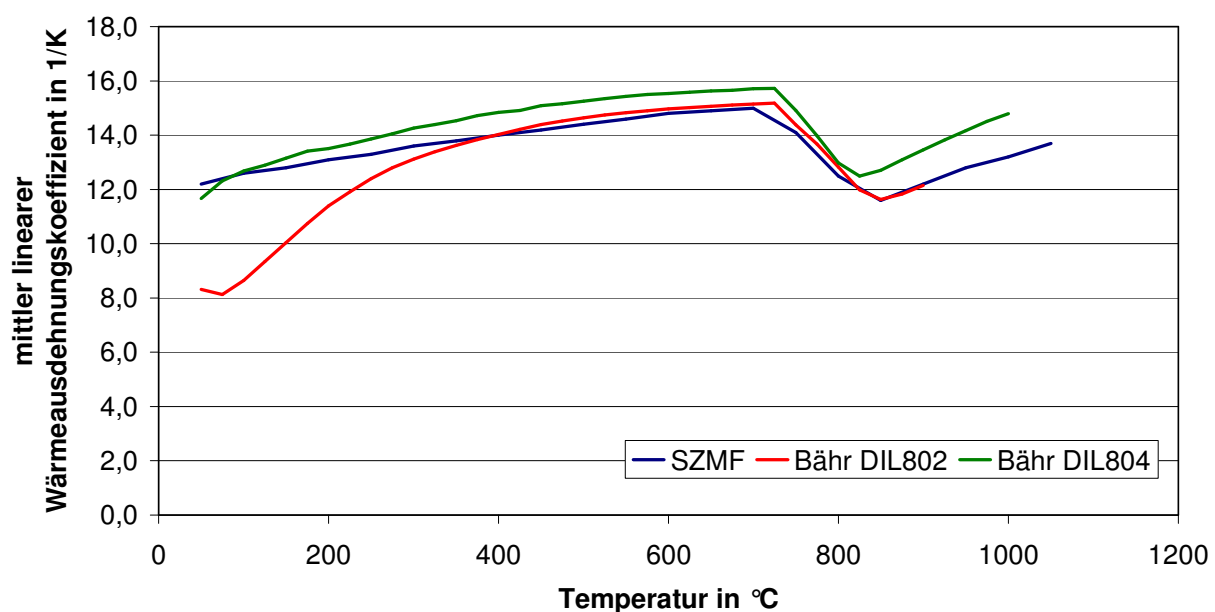


Abb. 6.21 Verlauf des Wärmeausdehnungskoeffizienten über die Temperatur

6.7 Dichte

Mit der Kenntnis des Wärmeausdehnungskoeffizienten α kann die Dichte des untersuchten Werkstoffes experimentell und rechnerisch bestimmt werden. Mittels des archimedischen Prinzips wurde an insgesamt sechs Rundproben $\varnothing 8,5 \times 130$ mm die Dichte bei 20 °C ermittelt und der Durchschnittswert $d_{(20)}$ bestimmt. Die Werte der Dichte $d_{(T)}$ wurden bis zu einer Temperatur $T = 1050$ °C nach der Beziehung der Gl. (6.9) errechnet.

$$d_{(T)} = d_{(20)} / [1 + \alpha \cdot (T - 20)]^3 \quad (6.9)$$

Aufgrund der Korrelation zwischen Dichte und Wärmeausdehnungskoeffizient weist der Verlauf der Dichte über der Temperatur analog zur Wärmeausdehnung im Bereich der Ferrit/Austenit-Umwandlung eine Unstetigkeit auf, vgl. Abb. 6.22. Diese Unstetigkeit lässt sich dadurch erklären, dass das kfz-Gitter des Austenits der kubisch dichtesten Packung der Elementarzelle entspricht, was sich auch in einem Vergleich der Packungsdichten (Raumerfüllung) zwischen dem krz-Gitter des Ferrits (PD = 0,68) und dem kfz-Gitter des Austenits (PD = 0,74) widerspiegelt. RICHTER [1974] schlägt vor, vereinfachend den Verlauf der Dichte im Bereich von 0 bis 1000 °C durch einen linearen Ansatz zu beschreiben. Für niedriglegierte Stähle wird eine Steigung von $\Delta d/\Delta T = -0,36$ kg/(m³·°C) angegeben, die sich aus dem Mittelwert des Wärmeausdehnungskoeffizienten herleitet. Mit den gemessenen Wärmeausdehnungskoeffizienten kann die Steigung für den untersuchten S355J2G3 zu $\Delta d/\Delta T = -0,32$ kg/(m³·°C) bestimmt werden. Dieser

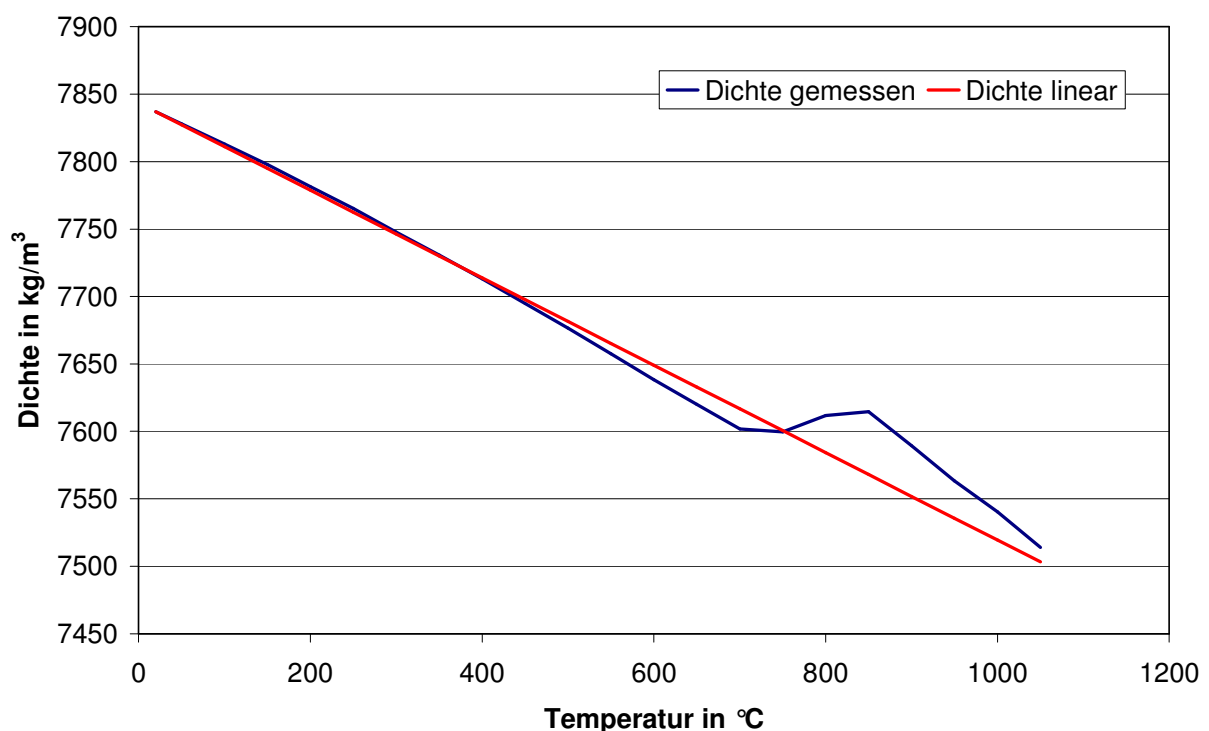


Abb. 6.22 Verlauf der Dichte über die Temperatur

lineare Ansatz scheint für eine ingenieurmäßige Betrachtung auch gerechtfertigt, da nach RICHTER für einen kohlenstoffarmen Stahl die Änderungen der Dichte infolge der Phasenumwandlungen im festen Zustand weniger als 1% ausmachen. Für die Steigung von -0,32 ist lineare Verlauf der Dichte in Abb. 6.22 zusätzlich dargestellt. Mit dem Übergang zur Schmelze kommt es zu einer sprunghaften Abnahme der Dichte, die RICHTER mit rd. 4% angibt.

6.8 Spezifischer elektrischer Widerstand

Kennzeichnend für den metallischen Zustand ist ein hohes elektrisches und thermisches Leitvermögen, welches auf den in einem Metall „quasifreien“, nicht an einzelne Atome gebundenen, Elektronen beruht. Die Leitfähigkeit ist materialabhängig und wird stark beeinflusst von der Temperatur, Verunreinigungen, Legierungselementen, Gitterfehlern, Phasenkonstitutionen und Überstrukturen (siehe z.B. [RICH 1974, WERK 1984, BARG 2000, HORN 2001, GOTT 2001]). Gemäß der *Matthiessen-Regel* lässt sich der Widerstand in einen temperaturabhängigen, durch Gitterschwingungen der Atomrümpfe verursachten Anteil ρ_G und einen temperaturunabhängigen Anteil, den Restwiderstand ρ_0 (Gitterbaufehler, Verunreinigungen, usw.), aufteilen, siehe Gl. (6.10).

$$\rho(T) = \rho_0 + \rho_G(T) \quad (6.10)$$

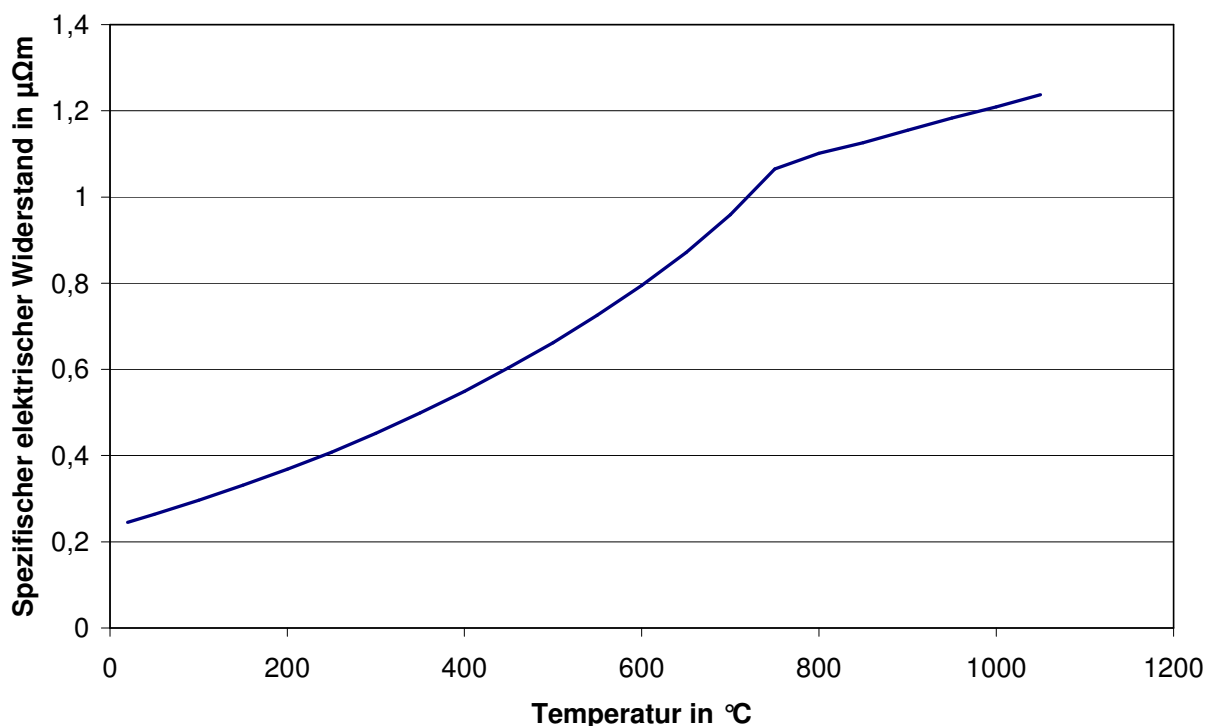


Abb. 6.23 Verlauf des spezifischen elektrischen Widerstandes über die Temperatur

Die Bestimmung der Temperaturabhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes erfolgte durch Messung in zwei Schritten. Zunächst wurde mittels der *Strom-Spannungsmethode* in einem auf 20 °C thermostatisierten Ölbad der elektrische Widerstand an insgesamt sechs Rundproben Ø 8,5 x 130 mm bestimmt, wobei drei Längs- und drei Querproben untersucht wurden. Durch die unterschiedliche Orientierung soll gewährleistet werden, dass der Widerstand unabhängig von eventuellen Inhomogenitäten, z.B. Texturen, erfaßt wird. Um bei der Messung kleinster Widerstände Messfehler infolge von Übergangswiderständen oder Widerständen aus der Messleitung zu vermeiden, wurde die Messung im *Vierleiterverfahren* durchgeführt. Die Messung der eigentlichen Temperaturabhängigkeit des Widerstandes erfolgte in einem mit Helium gefüllten Rezipienten bei einer Temperaturänderungsgeschwindigkeit von 5 K/min, wobei der Bezug zu den Ergebnissen der Messung bei 20 °C erfolgte. Die Auswertung der Messung ist in Abb. 6.23 dargestellt, die Angabe von Wertepaaren ist der Anlage zu entnehmen. Deutlich zu erkennen ist der parabelförmige Anstieg des Widerstandes bis rd. 800 °C und der anschließend nahezu lineare Verlauf, welcher nach GOTTSTEIN [2001] typisch für Stähle ist. Nach RICHTER [1974] liegen auftretende Anomalien im Temperaturverlauf des Widerstandes an den Phasenumwandlungspunkten ($\alpha \rightarrow \gamma$, $\gamma \rightarrow \delta$) unterhalb von 1%, wo hingegen sich der Widerstand beim Übergang zur Schmelze sprunghaft um rd. 5 bis 10 % vergrößert.

6.9 Wärmeleitfähigkeit

Die Temperatur in einem Körper kann als ein Maß für die Stärke der Gitterschwingungen (Phononen) aufgefasst werden, je höher die Temperatur, umso größer ist die Amplitude der Schwingung der Atomrümpfe im Metall. Die Wärmeleitung in einem Körper stellt sich somit als die Weitergabe der Gitterschwingungen an weniger angeregte Bereiche dar. Zur Energieübertragung tragen nach [RICH 1974, WERK 1984, BARG 2000, HORN 2001, GOTT 2001] die zwei Mechanismen der gekoppelten Schwingungen der Gitterbausteine sowie die Leitfähigkeit der freien Elektronen bei. Nach GOTTSTEIN [2001] erfolgt die Wärmeleitung oberhalb der Raumtemperatur im Wesentlichen durch die freien Leitungselektronen, so dass eine Verknüpfung zwischen der elektrischen Leitfähigkeit σ und der Wärmeleitfähigkeit λ in Abhängigkeit der Temperatur T besteht (*Wiedemann-Franz-Lorenzsche Gesetz*), s. Gl. (6.11).

$$\frac{\lambda}{\sigma} = L \cdot T \quad (6.11)$$

Die Lorenzkonstante L ist für jedes Metall unterschiedlich, für reines Eisen wird L mit $3,03 \cdot 10^{-8} \text{ V}^2/\text{K}$ angegeben, vgl. WERK [1984]. Praktische Bedeutung besitzt die Beziehung (6.11) zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit bei hohen Temperaturen, da eine experimentelle Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit stets mit größeren Fehlern behaftet ist. Daher wurde der temperaturabhängige Verlauf der Wärmeleitfähigkeit aus den ermittel-

ten Werten des elektrischen Widerstandes rechnerisch bestimmt. In Ermangelung der genauen Kenntnis der Lorenzzahl erfolgte die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit aus der Mittelwertbildung der von POWELL [1963] und BUNGARDT [1965] angegebenen Beziehungen, basierend auf dem *Wiedemann-Franz-Lorenzschen Gesetz*, vgl. Gl. (6.12) bis (6.14).

$$\lambda = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \quad (6.12)$$

$$\lambda_1 = \frac{2,43 \cdot 10^{-2} \cdot T}{\rho} + 9,2 \quad \text{nach POWELL [1963]} \quad (6.13)$$

$$\lambda_2 = \frac{2,985 \cdot 10^{-2} \cdot T}{\rho} + \frac{1,674}{\rho} \quad \text{nach BUNGARDT [1965]} \quad (6.14)$$

ρ : spezifischer elektrischer Widerstand
 T : absolute Temperatur

Der sich aus der Auswertung der Gl. (6.12) bis (6.14) ergebende Verlauf der Wärmeleitfähigkeit über die Temperatur ist in Abb. 6.24 dargestellt, die entsprechenden Wertepaare können dem Anhang entnommen werden.

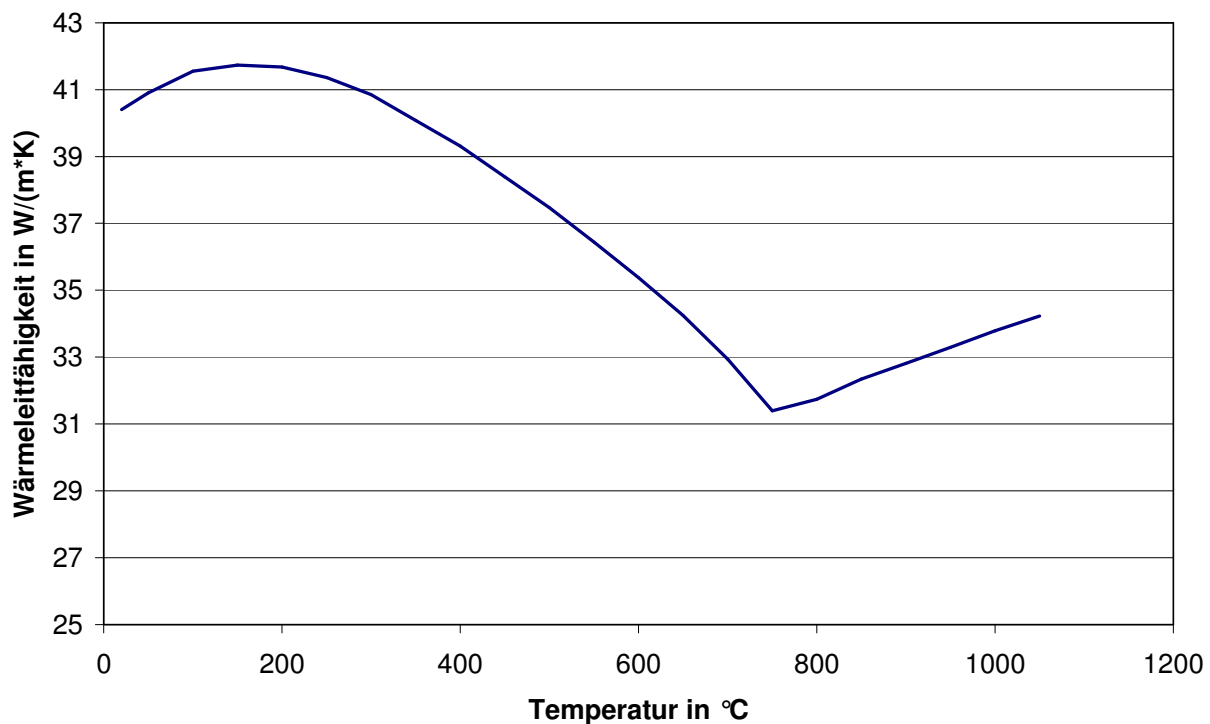


Abb. 6.24 Verlauf der Wärmeleitfähigkeit über die Temperatur

6.10 Spezifische Wärmekapazität

Für die Temperaturfeldberechnung ist es von entscheidender Wichtigkeit, die Energiemenge zu kennen, welche erforderlich ist, um die Temperatur einer Stoffmengeneinheit um 1 K zu erhöhen. Damit kommt der spezifischen Wärmekapazität eine besondere Bedeutung zu. Die Bestimmung der mittleren spezifischen Wärmekapazität im Temperaturbereich von 20 bis 700 °C erfolgte mittels eines Kalorimeters des Typs DSC7[®] der Fa. Perkin Elmer. Gemessen wurde die Wärmekapazität an einer Rundprobe Ø 6 x 1 mm, bei einer Aufheizgeschwindigkeit von 20 K/min. Insgesamt wurden 2 Messungen durchgeführt. Wie aus der Abb. 6.25 ersichtlich, steigt die Wärmekapazität mit zunehmender Temperatur zunächst parabelförmig an. Im Bereich der Phasenumwandlungspunkte bzw. beim Übergang zur Schmelze treten nach RICHTER [1974] und WERK [1984] Sprünge im Verlauf auf, welche aus der Umwandlungswärme herrühren. Eine genaue Angabe zur Größe der Umwandlungswärme bei un- und niedriglegierten Stählen liegt derzeit nicht vor, so dass hier weiterer Forschungsbedarf besteht.

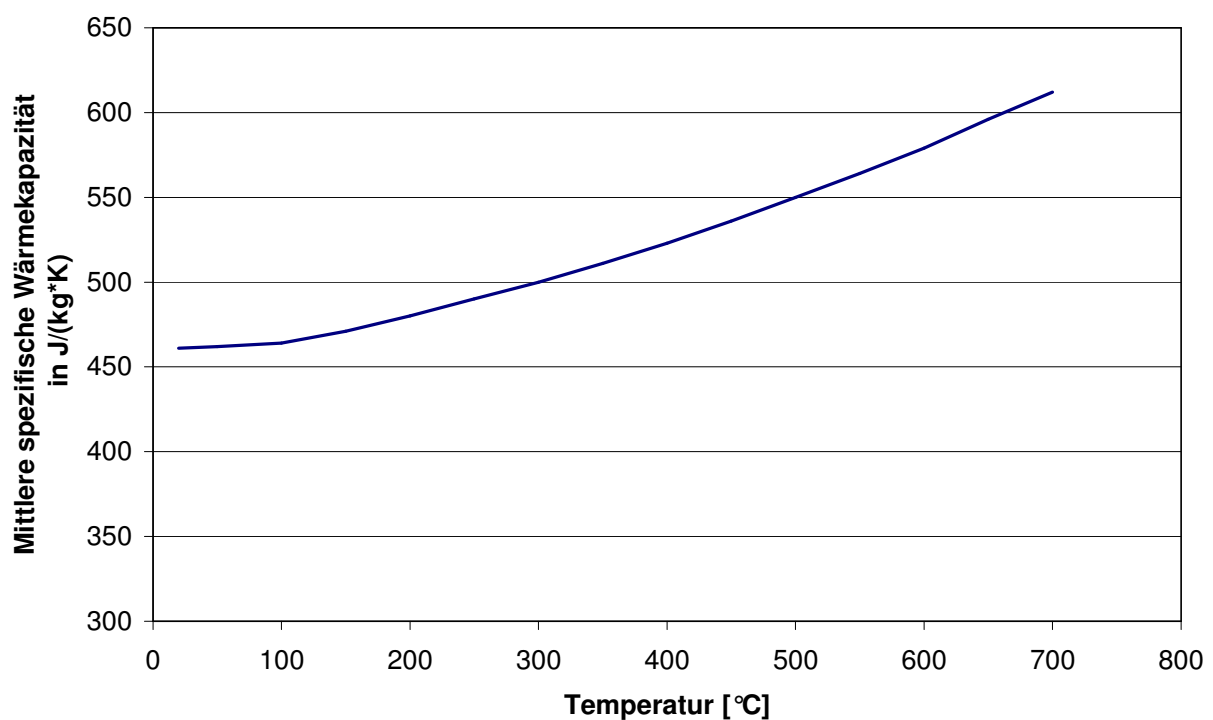


Abb. 6.25 Verlauf der mittleren spezifischen Wärmekapazität über die Temperatur

6.11 Quasi-Isotropie des Werkstoffes

Wie die metallurgischen Untersuchungen des Kapitels 5.2 zeigen, weist der untersuchte Baustahl S355J2G3 eine zeilenförmige Walztextur auf. Zur Überprüfung der Quasi-Isotropie des Werkstoffes, welche eine Annahme der numerischen Simulation darstellt, als auch zur Verifikation einzelner Basiswerkstoffkennwerte, wurden je drei Längs- und drei Querproben bei 20 °C bzw. 25 °C hinsichtlich der Dichte, des spezifischen elektrischen Widerstands, des dynamischen E-Moduls, des dynamischen G-Moduls und der Querkontraktionszahl untersucht. Das Ergebnis dieser Untersuchungen ist in Tab. 6.3 dargestellt. Die Streuungen der einzelnen Kennwerte liegen innerhalb der möglichen Messgenauigkeit. Es darf somit eine ausreichende Isotropie des Werkstoffes unterstellt werden.

Tab. 6.3 Überblick Materialeigenschaften

Probe Nr.	Dichte $d_{(20)}$ [kg/m ³]	Spez. elektr. Widerstand $\rho_{(20)}$ [$\mu\Omega\text{m}$]	Dyn. E-Modul $E_{(25)}$ [N/mm ²]	Dyn. G-Modul $G_{(25)}$ [N/mm ²]	Dyn. Querkon- traktionszahl $\nu_{(25)}$ [-]
1L	7837	0,245	212,9	82,7	0,287
2L	7837	0,245	213	82,8	0,286
3L	7836	0,245	212,9	82,7	0,287
1Q	7836	0,245	211,2	83,1	0,271
2Q	7837	0,245	211,2	83,2	0,269
3Q	7837	0,245	211,4	83,3	0,269
Mittelwert	7837 \pm 1	0,245 \pm 0,000	212,1 \pm 0,9	83,0 \pm 0,3	0,278 \pm 0,009

Kapitel 7

Numerische Simulation des Schweißprozesses

7.1 Allgemeine Vorgehensweise

Zur Abschätzung der Lebensdauer einer Konstruktion ist es von größter Wichtigkeit, den Ausgangszustand, insbesondere hinsichtlich vorhandener Kerben und Eigenspannungen, genau zu beschreiben. Gerade die hinreichende Erfassung auftretender Schweißeigenspannungen ist nur mittels aufwendiger Messverfahren (*Bohrlochmethode*, *Röntgendiffraktometrie*, *Barkhausen-Rauschen*) am Bauteil selbst oder an Schweißproben möglich. Nachteil aller bekannten Verfahren ist, dass die Eigenspannungsbestimmung nur punktuell oder kleinflächig erfolgt und dass es in Abhängigkeit des Verfahrens zu einer Beschädigung des Bauteils kommt. Ferner sind experimentelle Parameterstudien, die das Bauteilverhalten in Abhängigkeit verschiedenen Einflussfaktoren aufzeigen, im höchsten Maße zeitaufwendig und kostenintensiv.

Die numerische Simulation mittels der FE-Methode bietet im Gegensatz zur experimentellen Untersuchung den Vorteil, dass Untersuchungen der Abhängigkeiten und Einflüsse auf das Bauteilverhalten einfacher und kostengünstiger durchgeführt werden können. Eine Darstellung der zeitlichen Entwicklung einzelner Größen, z.B. der Spannungen infolge des Schweißprozesses ist erst durch die numerische Simulation großflächig möglich. Um zu realistischen Aussagen mittels der FE-Methode zu gelangen, ist es jedoch unumgänglich, die Simulation des Schweißprozesses sowie der strukturellen Beanspruchung ausreichend genau zu beschreiben. Insbesondere die Kenntnis des transienten Temperaturfeldes infolge des Schweißprozesses ist für die Bestimmung des Eigenspannungszustandes von entscheidender Wichtigkeit, da die mechanischen Werkstoffkennwerte eine starke Temperaturabhängigkeit aufweisen, vgl. u.a. PEIL und WICHERS [2004, 2005A].

Ziel einer numerischen Schweißsimulation ist es im Idealfall, eine Aussage über den Schweißprozess in seiner Gesamtheit zu geben. Die Schweißsimulation stellt sich dabei als ein komplexes Netzwerk aus Einzelsimulationen und Teilprozessen dar. Deutlich wird dies, wenn man sich den Begriff der „Schweißsimulation“ mittels des aus RADAJ [1999] entnommenen Diagramms (Abb. 7.1) verdeutlicht. RADAJ untergliedert hier den Schweißsimulationsprozess in die drei Bereiche der Prozess-, Konstruktions- und Werkstoffsimulation. Alle drei genannten Bereiche treten in Interaktion und beeinflussen sich mehr oder weniger stark, d.h. die Einzelprozesse weisen eine Kopplung auf. Eine

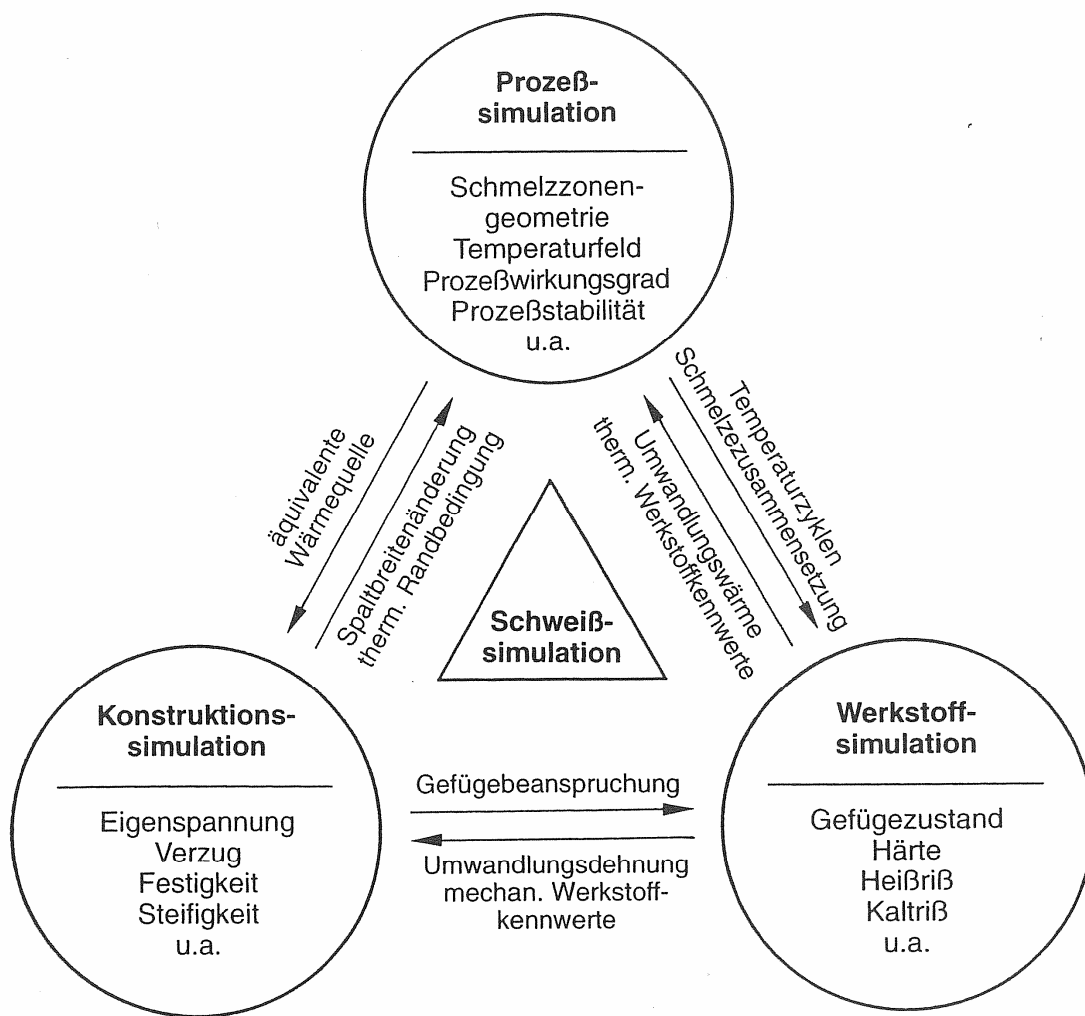


Abb. 7.1 Aufbau einer Schweißprozesssimulation nach RADAJ [1999]

ganzheitliche Formulierung des Schweißproblems scheint jedoch zum gegenwärtigen Zeitpunkt aufgrund der fehlenden technischen Voraussetzungen und wissenschaftlichen Kenntnisse nicht möglich. Für eine ingenieurmäßige Betrachtung ist daher eine Vereinfachung der Schweißsimulation unumgänglich, was i.d.R. durch eine Einzelbetrachtung bzw. Entkopplung der Prozesse erfolgt (siehe z.B. [Karl 1986, Schi 1998, Radaj 1999]). In der vorliegenden Arbeit wird daher die numerische Simulation in einen thermischen und einen strukturellen Lösungsabschnitt unterteilt. Die beide Lösungsabschnitte weisen dabei eine einsinnige Kopplung auf. Dieses Vorgehen scheint vertretbar, da die untersuchten Beanspruchungsgeschwindigkeiten und die damit verbundenen Wärmefreisetzen infolge der Verformung des Werkstoffes, im Vergleich zur eingebrachten Wärme durch den Schweißlichtbogen, innerhalb der strukturellen Berechnung sehr klein und damit ohne Einfluss auf das transiente Temperaturfeld sind. Entscheidend für den Erfolg der numerischen Simulation ist die Schaffung einer möglichst exakten Basis für die strukturelle Berechnung. Konkret bedeutet dies eine möglichst realistische Ermittlung des transienten Temperaturfelds während und

nach der Schweißung. Die Qualität des Berechnungsergebnisses sollte eine Abschätzung des sich einstellenden Gefüges (ZTU-Schaubild) für eine Optimierung des Schweißprozesses, z.B. durch Beeinflussung der Temperaturführung, ermöglichen. Aufbauend auf den Ergebnissen der numerischen Berechnung des Temperaturfeldes erfolgt in einer nachgeschalteten Simulationsrechnung die Bestimmung der transienten Spannungs- und Kräfteverteilung im Bauteil. Das Ergebnis der Berechnung dient der Beurteilung des Verhaltens der Gesamtkonstruktion während und nach dem Schweißprozess. Steifigkeitsveränderungen und Kraftumlagerungen im Bauteil bzw. der Konstruktion können im Vorwege erfasst und berücksichtigt werden, so dass das Simulationsergebnis auch als Grundlage für eine Lebensdauervorhersage dienen kann.

Für die numerischen Untersuchungen wird das FE-Programm ANSYS® verwendet. Das Vorgehen bei der Erstellung der Schweißsimulation ist klassisch und gliedert sich in die vier Abschnitte der Idealisierung, Modellerstellung (Preprocessing), Lösung (Solution) und Auswertung der Ergebnisse (Postprocessing). Zur Verifizierung der numerischen Simulation werden die Ergebnisse, der im Kapitel 3 beschriebenen Schweißversuche verwendet.

7.2 Abbildung des transienten Temperaturfeldes

Grundlagen für die Ermittlung des transienten Temperaturfeldes bilden der erste Hauptsatz der Thermodynamik (Energiebilanz) und das Fouriersche Grundgesetz der Wärmeleitung. Unter Berücksichtigung einer zusätzlichen Erhöhung der inneren Energie, hervorgerufen durch z.B. *Joulesche Wärme* oder Reaktionsumsätze, ergibt sich die Differentialgleichung der Wärmeleitung für das Temperaturfeld im kartesischen Koordinatensystem an einem differentiellen Volumenelement zu (RYKA 1957, SCHL 1997, BATHE 2002):

$$\rho c \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right) + q^B \quad (7.1)$$

ρ	Dichte
c	Wärmekapazität
ϑ	Temperatur
λ	Wärmeleitfähigkeit
q^B	zugeführte Wärmemenge pro Volumeneinheit

Die Lösung der dargestellten Differentialgleichung kann analytisch oder numerisch erfolgen, wobei ein analytisches Vorgehen nur für einfache Geometrien möglich ist und an Randbedingungen hinsichtlich des Wärmeeintrages (Punkt oder Linienquelle), der Temperaturunabhängigkeit der Werkstoffeigenschaften sowie der Nichtberücksichtigung der latenten Wärme beim Phasenübergang gekoppelt ist, vgl. ROSENTHAL [1941, 1946]. Daher kann eine analytische Lösung, insbesondere mit Hinblick auf die Temperaturabhängigkeit der Werkstoffparameter (PEIL UND WICHERS [2004, 2005A]), den Schweißprozess nicht ausreichend genau approximieren. Eine Lösung mittels der Finite-Element-Methode (FEM) erscheint als geboten.

7.2.1 Geometrie und Diskretisierung

Grundlage für die Verifikation der numerischen Simulation bilden Schweißversuche an Blechen $t = 6 \text{ mm}$ aus S 355J2G3, welche mittels Einlagenschweißung unter gleichzeitiger Bewegung der Nahtflanken bei verschiedenen Amplituden und Frequenzen durchgeführt wurden. In Anlehnung an die für die Schweißversuche verwendete Probengeometrie (Abb. 3.2) wurde unter Ausnutzung möglicher Symmetrien die in Abb. 7.2 dargestellte Geometrie für die numerische Simulation gewählt. Das Schweißnahtvolumen bzw. die Form ergibt sich aus der gewählten Schweißnahtvorbereitung sowie der Vermessung des Querschliffs einer abgeschweißten Probe, siehe Abb. 5.3. Um eine sinnvolle Vernetzung zu gewährleisten, wurde der virtuelle Probenkörper in vier Teilvolumina aufgeteilt. Dieses Vorgehen ermöglicht eine optimale Vernetzung der einzelnen Schweißnahtbereiche (Schweißnahtvolumen, Grob- und Feinkornzone, ungestörtes

Grundmaterial), wobei mit größer werdendem Abstand zur Schweißnaht eine gröbere Vernetzung der Struktur erfolgt.

Es ist hervorzuheben, dass im Bereich des Wärmeeintrags durch den Schweißlichtbogen eine kleinstmögliche Vernetzung anzustreben ist, da hier die größten Temperaturgradienten auftreten. Als Kantenlänge der einzelnen Volumenelemente hat sich eine Größe um 1 mm bewährt. Die Vernetzung der Bauteilstruktur erfolgte mit Volumenelementen vom Typ SOLID 70[®]. Das 3D-Temperatur-Volumenelement besitzt 8 Knoten mit je einem Temperaturfreiheitsgrad und gestattet den Wechsel in das Strukturelement SOLID 45[®] für die anschließende strukturelle Berechnung.

7.2.2 Werkstoffmodellierung

Ausgangspunkt für eine wirklichkeitsnahe Abbildung des Schweißprozesses und die Bestimmung des transienten Temperaturfeldes ist die Kenntnis des temperaturabhängigen Verhaltens der physikalischen Werkstoffkennwerte des zu untersuchenden Werkstoffes. Aufgrund des Fehlens entsprechender Werkstoffdaten bis in den Hochtemperaturbereich wurden eigene Versuche zu deren Bestimmung durchgeführt. Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche bilden die Grundlage zur Beschreibung des temperaturabhängigen Materialverhaltens innerhalb der numerischen Simulation und wurden in die FE-Simulation implementiert. Der temperaturabhängige Verlauf der einzelnen Werkstoffkennwerte ist den Abbildungen des Kapitels 6 sowie den Tabellen der Anlage zu entnehmen.

Im Gegensatz zu den übrigen Werkstoffkennwerten wurde der Verlauf der Wärmeleitfähigkeit im Hochtemperaturbereich modifiziert und ergibt sich für die numerische Simulation des transienten Temperaturfeldes gemäß der Abb. 7.3. Der modifizierte Verlauf zeigt einen steilen Anstieg der Wärmeleitfähigkeit ab einer Temperatur von 1500 °C. Die

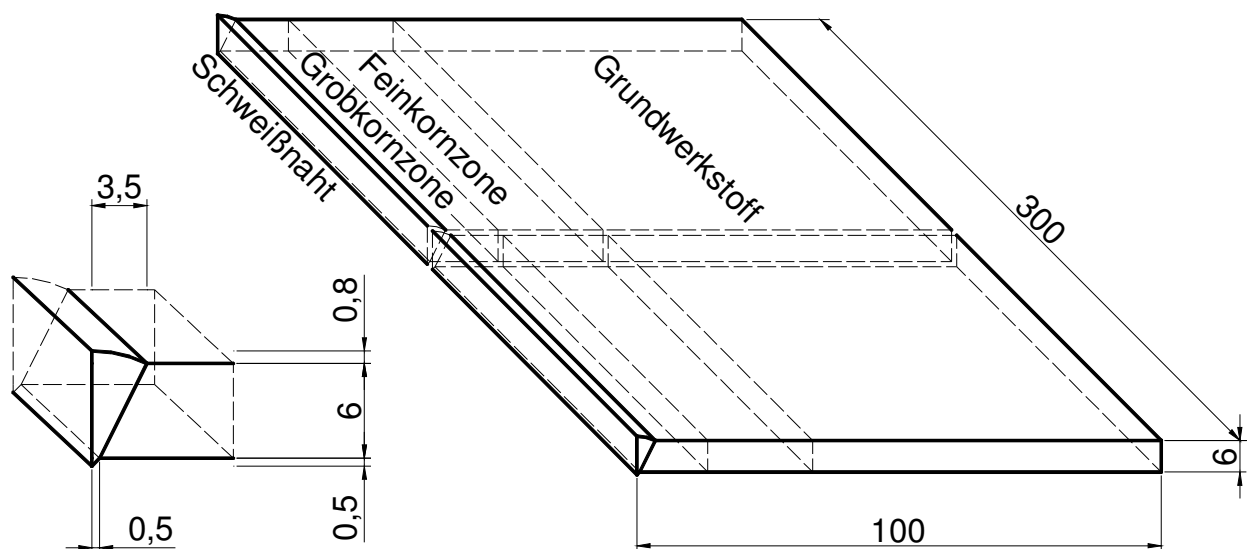


Abb. 7.2 Geometrie des virtuellen Schweißkörpers und der V-Naht (Halbmodell)

Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit auf einen Wert von $400 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, begründet sich in der Approximation konvektiver Wärmetransportvorgänge im Schmelzbad und erfolgt analog zu diversen Forschungsarbeiten (siehe z.B. [ARGY 1985, MOORE 1985, GOLD 1985, MAHR 1994, HAMA 1996]). Durch das „künstliche“ Heraufsetzen der Wärmeleitfähigkeit kann auf eine lokale und extrem aufwendige Strömungsberechnung verzichtet werden. Ferner zeigen die numerischen Untersuchungen, dass durch den Ansatz einer erhöhten Wärmeleitfähigkeit eine rechnerische Badüberhitzung vermieden werden kann, was zu einer Beschränkung der Spitzentemperaturen innerhalb des Schmelzbades auf realistische Werte von unterhalb $2300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ führt.

Treten infolge Erwärmung oder Abkühlung eines Körpers im Werkstoff Phasenübergänge (fest-flüssig, flüssig-gasförmig, allotropes Werkstoffverhalten) auf, so nimmt der Körper Energie auf oder gibt sie ab, ohne dabei wesentlich seine Temperatur zu verändern. Die Energie, die während des Phasenwechsels aufgenommen oder abgegeben wird, bezeichnet man als latente Wärme. Für die Abbildung des transienten Temperaturfeldes sowie der genauen Berechnung der Schmelzbadabmessungen ist es daher entscheidend, dass die latente Wärme bei der numerischen Simulation Berücksichtigung findet. Eine Berücksichtigung des Phasenwechsels und der damit verbundenen Energiefreisetzung bzw. -speicherung kann entweder mit einer nichtlinearen Funktion der Wärmekapazität oder einer nichtlinearen Funktion der Enthalpie in der numerischen Simulation realisiert werden.

Bei Ansatz einer nichtlinearen Funktion der Wärmekapazität wird die latente Wärmemenge auf ein fiktives Temperaturintervall aufgeteilt und in eine entsprechende Wärmekapazität umgerechnet, welche zur spezifischen Wärmekapazität des Materials addiert wird. Exemplarisch ist dieses Vorgehen für den Phasenübergang im Bereich der

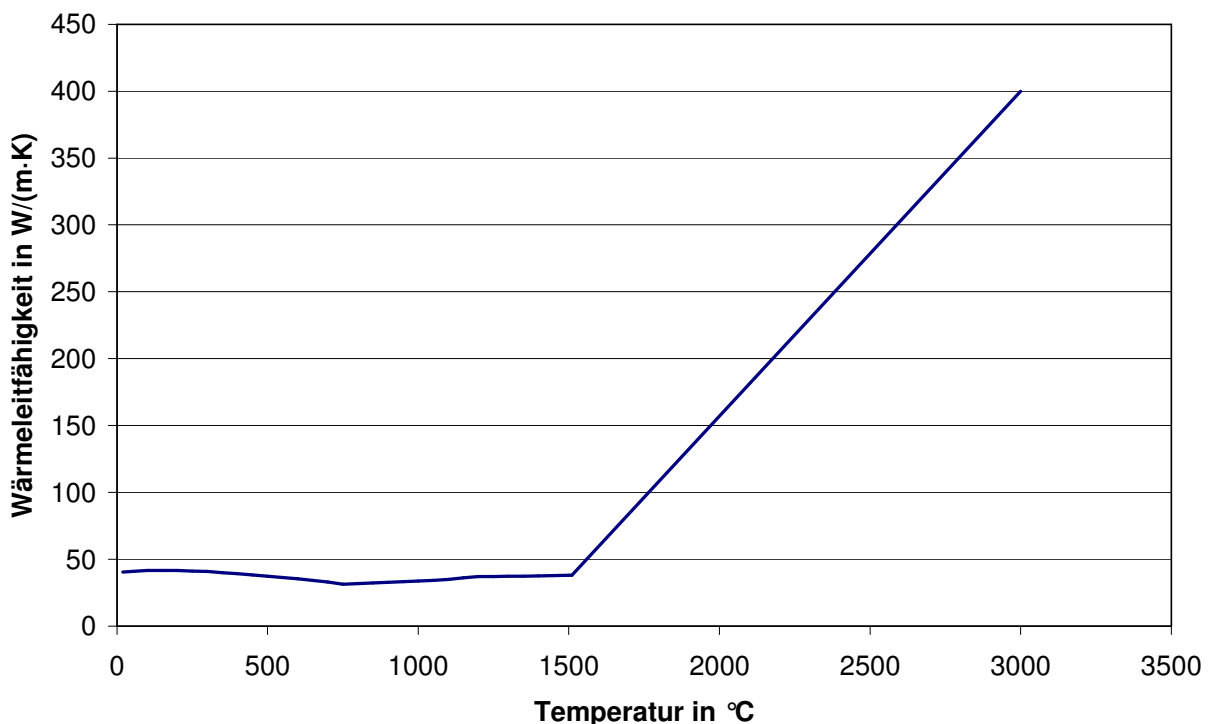


Abb. 7.3 Modifizierter Verlauf der Wärmeleitfähigkeit über die Temperatur

α - γ -Umwandlung in Abb. 7.4 dargestellt. Die spezifische Wärmekapazität weist zunächst einen kontinuierlichen Anstieg auf und besitzt in der Nähe der Umwandlungstemperatur eine ausgeprägte Spitze, welche theoretisch einer Unendlichkeitsstelle entsprechen würde, da bei der Phasenumwandlung eine Erhöhung der Enthalpie ohne Temperaturerhöhung stattfindet. Das Integral dieses „Impulses“, welcher über die benachbarten Bereiche der spezifischen Wärmekapazität hinausragt, entspricht der latenten Wärme der Phasenumwandlung. Die Abbildung der latenten Wärme mittels eines nichtlinearen Verlaufes der spezifischen Wärmekapazität erscheint für eine numerische Simulation des transienten Temperaturfeldes jedoch wenig vorteilhaft, da die Schrittfolge im Zeitbereich bzw. entsprechend einer Schrittfolge entlang der Temperaturachse schärfer begrenzt werden muss, soll der Einfluss der latenten Wärme ausreichend berücksichtigt werden. Anderenfalls kann es bei einer zu großen Wahl der Schrittweite zum Überspringen des erhöhten Niveaus kommen, in dessen Folge der Einfluss der latenten Wärme bei der Berechnung unberücksichtigt bleibt, vgl. RADAJ [1999] und GROTH [2001].

Zur Vermeidung dieses Problems hat es sich bewährt, die latente Wärme durch einen nichtlinearen, mit zunehmender Temperatur stetig steigenden, Verlauf der Enthalpie h in der numerischen Simulation zu berücksichtigen, siehe Abb. 7.5. Enthalpiesprünge im Bereich der Phasenumwandlung werden durch die numerische Simulation stets berücksichtigt, was die Wahl einer größeren Zeitschrittweite erlaubt. Die Verbindung der Wärmekapazität mit der Enthalpie wird nachstehend (vereinfacht) zum besseren Verständnis erläutert.

Grundlage der Temperaturfeldberechnung bildet der 1. Hauptsatz der Thermodynamik (Energieerhaltung). Die Gesamtenergie E eines Systems ergibt sich zu (siehe

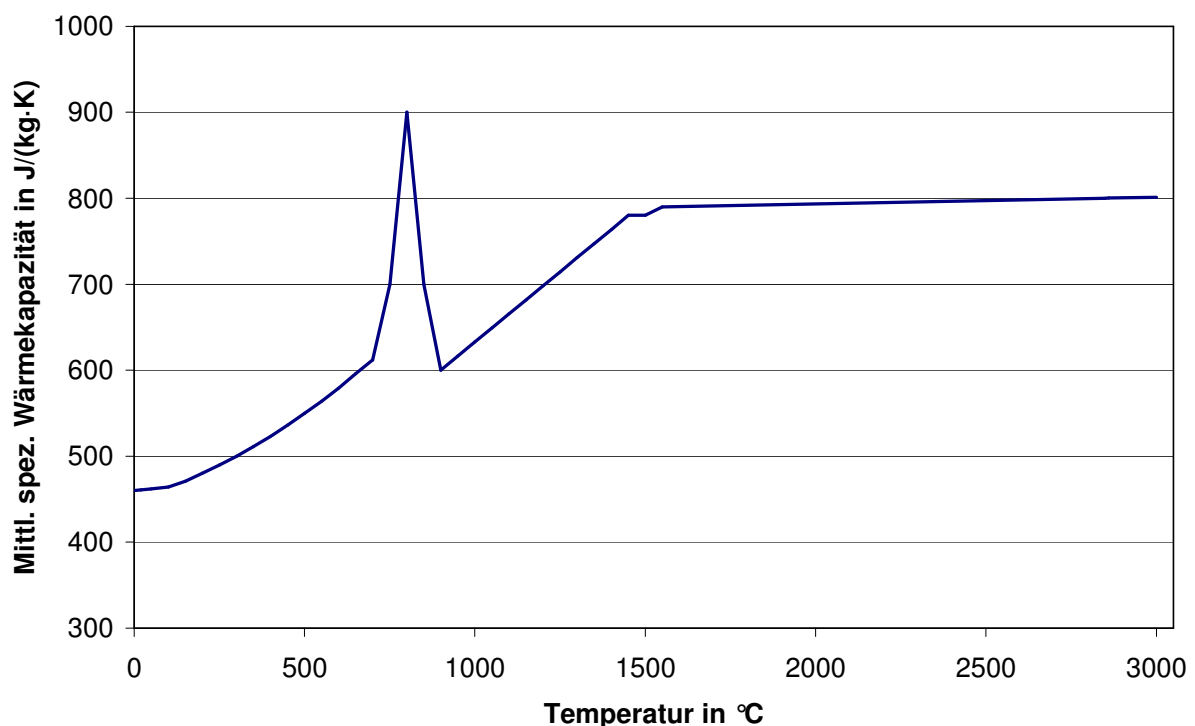


Abb. 7.4 Verlauf der mittleren spezifischen Wärmekapazität

auch [POUL 2000, HAKE 2002, FÖLL 2004]):

$$E = KE + PE + U \quad (7.2)$$

KE Kinetische Energie

PE Pot. Energie des Systems, bedingt durch die Lage im Gravitationsfeld der Erde

U Innere Energie, welche alle übrigen Energieformen enthält, hauptsächlich Wärme und Bindungsenergie

Der Unterschied zum Energiekonzept der Strukturmechanik besteht somit in der Erweiterung der Gleichung um die innere Energie U . Die Energieänderung eines Systems stellt sich aus der Differenz zwischen zwei Zuständen dar:

$$\begin{aligned} \Delta E &= E_2 - E_1 = (KE_2 - KE_1) + (PE_2 - PE_1) + (U_2 - U_1) \\ &= \Delta KE + \Delta PE + \Delta U \end{aligned} \quad (7.3)$$

Unter der Voraussetzung eines in Ruhe befindlichen Systems, welches seine Lage im Raum nicht verändert, können die Anteile der kinetischen Energie und der potentiellen Energie aus der Gl. (7.3) gestrichen werden. Diese Voraussetzungen liegen für die praktisch untersuchten Schweißproben vor: Die Energieanteile infolge der aufgebrachten Nahtflankenbewegungen sind aufgrund der geringen Geschwindigkeit für die thermische Betrachtung vernachlässigbar. Für die Energie des Systems folgt:

$$E = U \text{ bzw. } \Delta E = \Delta U \quad (7.4)$$

Mit dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik folgt für die Änderung der inneren Energie eines Systems:

$$dU = dQ - dW \quad (7.5)$$

Daraus ergibt sich, dass die Änderung der inneren Energie dU des betrachteten Systems gleich der zugeführten Wärmeenergie dQ abzüglich der nach außen geleisteten Arbeit dW ist. Die nach außen geleistete Arbeit kann sich beispielhaft als eine Volumenveränderung infolge der Wärmeausdehnung darstellen. Für die geleistete Volumenänderungsarbeit gilt in differentieller Form geschrieben:

$$dW = p \cdot dV \quad (7.6)$$

p Druck

dV differentielle Volumenänderung

Aufgrund der Nichtbehinderung der Volumenausdehnung des Schweißkörpers sowie der Beibehaltung des Umgebungsdruckes nimmt der erste Hauptsatz der Thermodynamik durch das Einsetzen von Gl. (7.6) in Gl. (7.5) die folgende Form an:

$$dU = dQ - p \cdot dV \quad (7.7)$$

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik beschreibt den quantitativen Zusammenhang zwischen den drei Energieformen Wärme, Arbeit und innerer Energie. Wärme und Arbeit sind dabei nicht an die Systemgrenzen gebunden und können diese überschreiten, während die innere Energie eine Eigenschaft (d.h. eine Zustandsgröße) des Systems darstellt. Um in vielen Beziehungen den Term $-p \cdot dV$ nicht berücksichtigen zu müssen, wurde der Begriff der Enthalpie eingeführt, welcher unter bestimmten Bedingungen anstelle der inneren Energie U verwendet werden kann. Die Enthalpie H ist definiert zu:

$$H = U + p \cdot V \quad (7.8)$$

Wie aus der Gleichung zu erkennen, stellt die Enthalpie die um die Wärmeausdehnung (Volumenänderungsarbeit) korrigierte innere Energie dar. Wird dem System Energie in Form von Wärme zugeführt, kommt es zu einer Änderung der inneren Energie und damit der Enthalpie. Für die Formulierung des ersten Hauptsatzes unter Verwendung der Enthalpie folgt durch Bildung des totalen Differentials:

$$dH = \frac{\partial H}{\partial U} dU + \frac{\partial H}{\partial p} dp + \frac{\partial H}{\partial V} dV = dU + V \cdot dp + p \cdot dV \quad (7.9)$$

Innerhalb der Gl. (7.9) kann der Term $V \cdot dp$ aufgrund der unterstellten Konstanthaltung des Druckes zu Null gesetzt werden. Durch Einsetzen der Gl. (7.7) in die Gl. (7.9) ergibt sich, dass die dem System (Schweißprobe) zugeführte Wärme, bei Vorliegen eines konstanten Druckes (gilt i.d.R. für Festkörper), zu einer Erhöhung der Enthalpie führt, vgl. Gl. (7.10). Die infolge der Wärmeeinbringung entstehende Volumenzunahme ist bei Festkörpern i.d.R. klein, so dass Enthalpie und innere Energie nahezu identisch sind.

$$dH = dQ - p \cdot dV + p \cdot dV \quad \Rightarrow \quad dh = dQ \quad (7.10)$$

Die Wärmekapazität C eines Werkstoffes ist definiert als der Quotient aus der differentiellen Zunahme der Wärmeenergie des Systems dQ und der differentiellen Änderung der Temperatur dT für einen Körper der Masse m :

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad (7.11)$$

Anders ausgedrückt ist die Wärmemenge, die einem System der Masse m zugeführt wird, proportional zu dessen Temperaturdifferenz:

$$dQ = C \cdot dT \quad (7.12)$$

Unter der Voraussetzung, dass der Druck im System eine Konstante ist, ergibt sich die Änderung der Enthalpie (näherungsweise der inneren Energie) zu:

$$dH = dQ = C_p \cdot dT \quad (7.13)$$

Der Index p kennzeichnet die Konstanz des Druckes. Um von der Stoffmenge des Systems unabhängig zu werden, wird die Gl. (7.13) durch die Masse m dividiert, wodurch sich die spezifischen Größen der Enthalpie und der Wärmekapazität ergeben:

$$dh = \frac{dH}{m} \quad (7.14)$$

$$c_p = \frac{C_p}{m} \quad (7.15)$$

$$dh = c_p \cdot dT \quad (7.16)$$

Der Verlauf der spezifischen Enthalpie ergibt sich aus der Integration des Verlaufs der spezifischen Wärmekapazität c_p korrigiert um die latente Wärme h_{Lat} an den Phasenumwandlungspunkten.

$$h(T) = \int_{T_0}^T c_p(T) dT \quad (+ h_{Lat} \text{ an den Umwandlungspunkten}) \quad (7.17)$$

Zu beachten ist, dass die Wärmekapazität eine vom Material, Druck und der Temperatur abhängige Größe ist. Für die numerische Simulation des transienten Schweißtemperaturfeldes ist daher zu beachten, dass die Materialzusammensetzung sowie der Druck bei dem c_p bestimmt worden ist, mit den Bedingungen der Schweißversuche übereinstimmen. In den Bereichen des Phasenwechsels weist der Funktionsverlauf der spezifischen Enthalpie einen Sprung auf, welcher der latenten Wärme entspricht, siehe Abb. 7.5. Die Abschätzung der latenten Wärme der einzelnen Phasenübergänge ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur unzureichend möglich, da die Angaben hierzu in der Literatur dürftig und wenig konkret sind. RICHTER [1974] gibt für reines Eisen eine spezifische Enthalpie am Schmelzpunkt (1536 °C) mit 260 ± 35 kJ/kg an, was einer Streubreite von $\pm 13,5\%$ entspricht. Die Umwandlungswärmen für die α - γ -Umwandlung (911 °C) werden mit $16,3 \pm 0,2$ kJ/kg und bei der γ - δ -Umwandlung (1391 °C) mit $15,2 \pm 0,2$ kJ/kg angegeben. Für die numerische Simulation von größerer Bedeutung ist die Energie, die zum Verdampfen des Werkstoffes überwunden werden muss. MEHMERT [2003] gibt hierfür eine Enthalpiedifferenz bei 2850 °C von 6360 kJ/kg an. Der Einbau bzw. die Berücksichtigung der Verdampfungsenthalpie in der numerischen Simulation empfiehlt sich besonders, um einer unrealistischen Temperaturerhöhung in der Schmelze zu begegnen.

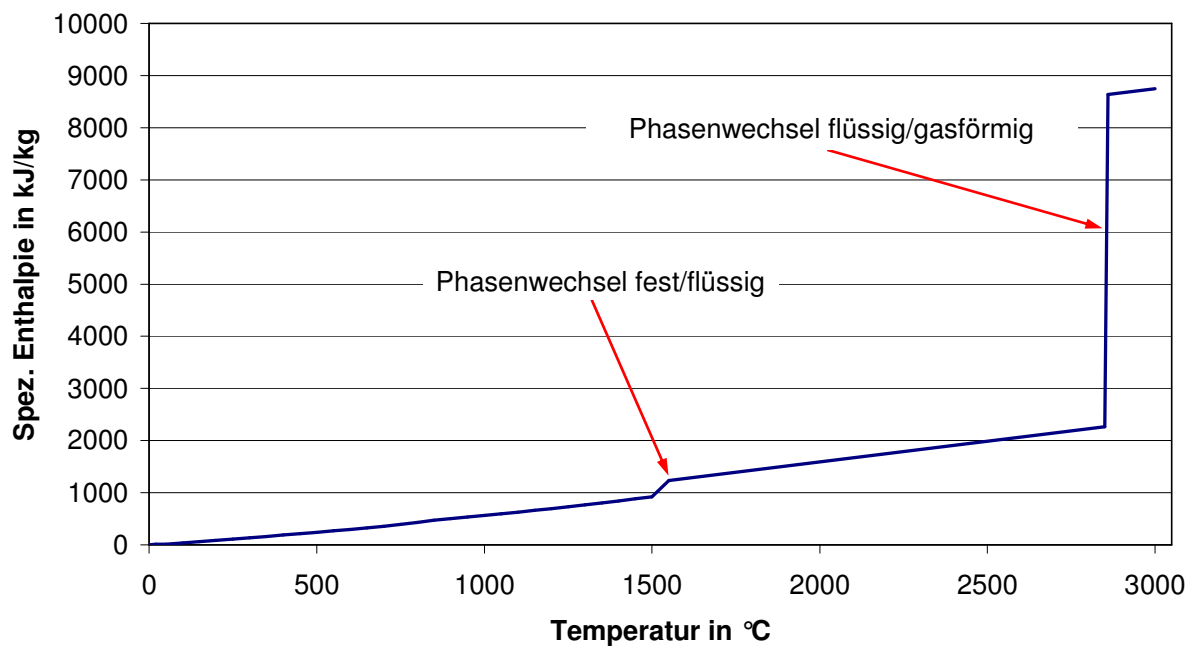


Abb. 7.5 Verlauf der spezifischen Enthalpie über die Temperatur

Wie vorstehend gezeigt, stellt die spezifische Enthalpie die Ableitung der spezifischen, massebezogenen Wärmekapazität dar. Für die numerische Verarbeitung im FE-Programm Ansys® muss die spezifische Enthalpie auf ein Volumen bezogen werden. Die Berechnung der spezifischen, volumenbezogenen Enthalpie h_V erfolgt gemäß der Gl. (7.18), durch Integration des Produktes aus spezifischer Wärmekapazität und Dichte.

$$h_V(T) = \int_{T_0}^T c_p(T) \cdot \rho(T) dT \quad (+ h_{\text{Lat}} \text{ an den Umwandlungspunkten}) \quad (7.18)$$

7.2.3 Thermische Randbedingungen

Die thermische Interaktion des Bauteils mit seiner Umgebung ist für die numerische Simulation des Temperaturfeldes von größter Bedeutung. Infolge des Schweißprozesses wird auf das Bauteil Energie übertragen, welche in unterschiedlichen Anteilen durch Konvektion und Wärmestrahlung letztlich an die Umgebung abgeführt wird. Soll dieses Verhalten in der numerischen Simulation berücksichtigt werden, so ist der Wärmeübergang vom Bauteil zur Umgebung als Randbedingung mathematisch/physikalisch zu beschreiben. Die Wärmestromdichte \dot{q} , welche beim Wärmeübergang auftritt, kann mittels des Newtonschen Abkühlungsgesetzes gemäß Gl. (7.19) definiert werden.

$$\dot{q} = \alpha \cdot (\vartheta_B - \vartheta_F) \quad (7.19)$$

\dot{q}	Wärmestromdichte
α	Wärmeübergangskoeffizient
ϑ_B	Oberflächentemperatur Bauteil
ϑ_F	Temperatur des umgebenden Fluids

Zur Bestimmung der Wärmeübertragung ist die Kenntnis der Größe des Wärmeübergangskoeffizienten α notwendig. Dieser setzt sich aus je einem Anteil für Konvektion und Wärmestrahlung zusammen, vgl. Gl. (7.20).

$$\alpha_{ges} = \alpha_K + \alpha_S \quad (7.20)$$

Nach dem derzeitigen Kenntnisstand der Wärmeübertragung beeinflussen sich Konvektion und Strahlung nicht gegenseitig, so dass eine getrennte Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten von Konvektion und Strahlung möglich ist (siehe u.a. [RYKA 1957, PITTER 1992, SCHL 1997, BAEHR 1998]). Es ist anzumerken, dass die Anteile der Wärmeübertragung infolge Konvektion und Strahlung von der Temperatur abhängig sind. Liegt die Temperatur unter 300 °C erfolgt der Wärmeübergang zu größten Teilen durch Konvektion, wohingegen bei Temperaturen von z.B. 800 °C die Strahlung einen Anteil von 80 % an der Wärmeübertragung ausmacht. Für eine horizontal liegende, rechteckige Probenplatte wird nachstehend ein Lösungsvorschlag für die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten vorgestellt.

7.2.3.1 Wärmeübergangskoeffizient Konvektion

Unter Konvektion wird der Wärmeaustausch durch bewegte Gas- oder Flüssigkeitsteilchen verstanden. Der konvektive Wärmeübergang stellt eine Überlagerung von Wärmeleitung und Energietransport durch das strömende Fluid da. Dieser Vorgang kann gedanklich als eine in das Fluid ortsfest ragende Fläche aufgefasst werden, durch die das Fluid strömt, wobei infolge des Temperaturgradienten Wärme in die Fläche fließt und vom Fluid abtransportiert wird (Enthalpie und kinetische Energie des Fluids), siehe BAEHR [1998]. Es ist ersichtlich, dass für den Wärmetransport die Strömungsverhältnisse im Fluid von Bedeutung sind. Somit ist für die weitere Betrachtung zu unterscheiden, ob die sich einstellende Fluidströmung infolge der Dichteunterschiede durch Erwärmung des Fluids hervorgerufen (freie Konvektion) oder dem Fluid aufgezwungen wird (erzwungene Konvektion). Für die numerische Simulation des Temperaturfeldes wurde unterstellt, dass die Schweißung in ruhender Luft bei einer Raumtemperatur von 20 °C erfolgt. Eine erzwungene Strömung der umgebenden Luft, z.B. durch Wind oder Abluftströmungen soll nicht vorliegen. Grundlage aller weiteren Überlegungen ist somit die sich einstellende freie Konvektion über einer erwärmten, horizontal liegenden Platte.

Die Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangs und damit der Auffindung des Wärmeübergangskoeffizienten, kann durch Herleitung der Nusselt-Zahl aufgezeigt werden. Eine ausführliche Darstellung ist BAEHR [1998] zu entnehmen.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot \ell}{\lambda} = f(Gr, Pr, \text{Geometrie}) \quad (7.21)$$

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{\ell} \quad (7.22)$$

Aufgrund der Komplexität der zur Beschreibung des konvektiven Wärmeübergangs aufzustellenden Differentialgleichungen ist eine analytische Lösung nur in wenigen Fällen möglich. Für die freie Konvektion über einer rechteckigen, horizontal liegenden Platte, sind von AL-ARABI und EL-RIEDY [1976] empirische Ansätze gefunden und in Abhängigkeit der Geometrie, des Temperatur- und Strömungsfeldes angegeben worden, siehe Gl. (7.23a) und (7.23b).

Laminarer Bereich $Ra < 4 \cdot 10^7$

$$Nu = 0,70 \cdot Ra^{\frac{1}{4}} \quad (7.23a)$$

Turbulenter Bereich $Ra \geq 4 \cdot 10^7$

$$Nu = 0,155 \cdot Ra^{\frac{1}{3}} \quad (7.23b)$$

Eine Unterteilung, der sich bei freier Konvektion einstellenden Strömung in laminar oder turbulent ist von der Größe der *Rayleigh-Zahl* Ra abhängig, welche sich aus der Multiplikation von *Grashof-Zahl* Gr und *Prandtl-Zahl* Pr ergibt.

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (7.24)$$

Die *Grashof-Zahl* (siehe Gl. 7.25) beschreibt das Verhältnis der Auftriebskräfte zu den auftretenden Reibungskräften. Eine detaillierte Herleitung ist den Ausführungen im VDI-WÄRMEATLAS [1997] und BAEHR [1998] zu entnehmen.

$$Gr = \frac{g \cdot \ell^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta T \quad (7.25)$$

g	Erdbeschleunigung
l	Überströmlänge der kürzeren Plattenseite
β	räumlicher Wärmeausdehnungskoeffizient
ΔT	Temperaturdifferenz Fluid/Bauteil
ν	kinematische Viskosität

Unter der Annahme, dass Luft für technische Berechnungen als ideales Gas angesehen werden darf, vgl. SCHL [1997] und БӨCKH [2004], hängt der räumliche Wärmeausdehnungskoeffizient nur von der Absoluttemperatur T_0 des Fluids ab.

$$\beta = \frac{1}{T_0} \quad (7.26)$$

Durch die *Prandtl-Zahl* erfolgt die Verknüpfung des Temperatur- und Geschwindigkeitsfeldes im Fluid.

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu \cdot \rho \cdot c}{\lambda} \quad (7.27)$$

ν	kinematische Viskosität des Fluids
a	Temperaturleitfähigkeit des Fluids
ρ	Dichte
c	spezifische Wärmekapazität
λ	Wärmeleitfähigkeit

Die zur Ermittlung der einzelnen Kenngrößen notwendigen temperaturabhängigen Stoffwerte der Luft (λ, ν, Pr), können SCHL [1997] entnommen werden und sind für eine mittlere Temperatur zu bestimmen $(\vartheta_B + \vartheta_F)/2$.

Der Wärmeübergangskoeffizient (Konvektion), welcher sich aus den vorgestellten Ansätzen nach AL-ARABI und EL-RIEDY [1976] bestimmen lässt, beschreibt ausschließlich den Wärmeübergang infolge freier Konvektion an der Plattenoberseite. Für den Wärmeübergangskoeffizienten an den Plattenrändern sowie der Plattenunterseite, kann nach PITTER [1992] in Näherung Gl. (7.28) zugrunde gelegt werden.

$$\alpha_{konv, Unterseite} \approx 0,5 \cdot \alpha_{konv, Oberseite} \quad (7.28)$$

7.2.3.2 Wärmeübergangskoeffizient Strahlung

Die Wärmeübertragung durch Strahlung unterliegt anderen physikalischen Gesetzen als der konvektive Wärmeübergang oder die Wärmeleitung. Jeder Körper emittiert und absorbiert bei Temperaturen $T \neq 0$ K Energie in Form von Wellen (Wärmestrahlung), deren Ausbreitung nicht an ein Trägermedium gebunden ist. Eine Energieübertragung ist somit auch im Vakuum möglich. Die Wärmestrahlung, die ein Körper emittiert, ist nach oben begrenzt und hängt letztlich nur von der thermodynamischen Temperatur des Körpers ab. Als Maßstab dient der so genannte ideale „schwarze Körper“, welcher bei einer bestimmten Temperatur die maximale Strahlung emittiert. Nach dem *Stefan-Boltzmann-Gesetz* ergibt sich die maximale Wärmestromdichte eines ideellen schwarzen Körpers zu:

$$\dot{q} = \sigma \cdot T^4 \quad (7.29)$$

σ Stefan-Boltzmann-Konstante = $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

Im Gegensatz zu einer schwarzen Oberfläche emittieren und absorbieren nicht schwarze Oberflächen weniger Strahlung. Das Verhältnis der insgesamt von einer realen Fläche in den Halbraum abgestrahlten Energie zu derjenigen einer schwarzen Fläche wird durch den *Emissionsgrad* ε beschrieben. Es folgt somit für die Wärmestromdichte

$$\dot{q} = \varepsilon(T) \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (7.30)$$

Der Emissionsgrad hängt dabei von der Oberflächenbeschaffenheit des Materials (poliert, gewalzt, oxidiert, etc.) und der Oberflächentemperatur des strahlenden Körpers ab. Zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten kann analog zur Konvektion das *Newtonsche Abkühlungsgesetz* herangezogen werden. Durch das Gleichsetzen der Gl. (7.19) und (7.30) folgt

$$\varepsilon(T) \cdot \sigma \cdot (v_B - v_F)^4 = \alpha_S \cdot (v_B - v_F) \quad (7.31)$$

Aufgelöst ergibt sich für den Anteil der Strahlung am Gesamtwärmeübergangskoeffizienten

$$\alpha_S = \varepsilon(T) \cdot \sigma \cdot (v_B^2 - v_F^2) \cdot (v_B + v_F) \quad (7.32)$$

7.2.4 Simulation des Schweißlichtbogens

Für die realistische Bestimmung des transienten Temperaturfeldes mittels der FEM ist, neben der korrekten Beschreibung der Werkstoffgesetze, die Modellierung des Wärmeeintrages in das Bauteil von entscheidender Bedeutung. Die durch den Schweißprozess ins Bauteil eingebrachte Wärmemenge Q wird innerhalb der numerischen Simulation durch den Wärmestrom \dot{Q} ersetzt, welcher sich in seiner Größe an den durchgeführten Schweißversuchen orientiert. Es ist zu beachten, dass zwischen der so genannten *Bruttolleistung* \dot{Q}_B , entsprechend der Ausgangsleistung am Schweißgerät und der *Nettolleistung* oder auch *Effektivleistung* \dot{Q}_E unterschieden werden muss, welche prozessbedingte Leistungsverluste berücksichtigt. Für das transiente Temperaturfeld maßgebend ist die Effektivleistung, da nur diese zu einer Temperaturänderung im Bauteil führt. Die prozessbedingten Leistungsverluste sind mannigfaltig und variieren stark vom Schweißverfahren, Lichtbogenart, Stromquelle, Brennerhaltung, Drahtdurchmesser, etc. Ferner treten Verluste durch Konvektion, Strahlung, Spritzer und Verdampfungsverluste

sowie Erwärmung der Elektrode auf. Zur Angleichung des Bruttowärmestroms an den Nettowärmestrom wird dieser mittels eines thermischen Wirkungsgrades η korrigiert (RYKA [1957], RADAJ [1998]).

$$\dot{Q}_E = \eta \cdot U \cdot I \quad (7.33)$$

Schweißstrom I und Schweißspannung U wurden für die Simulation als Messwerte aus den durchgeführten Schweißversuchen bestimmt. Zur Bestimmung der Effektivwerte am Lichtbogen erfolgte die Messung der Kenngrößen durch das Anbringen der Messsensoren in unmittelbarer Nähe des Kontaktrohres, vgl. Kapitel 2 und Abb. 2.15. Differenzen zwischen der Einstellung am Schweißgerät und den tatsächlich am Kontaktrohr anliegenden Werten konnten somit in der Messung berücksichtigt werden. Für den Wirkungsgrad werden in der einschlägigen Literatur Bandbreiten von 0,65 bis 0,90 angegeben (SIEHE AUCH [RYKA 1957, EICH 1972, RÖBE 1977, ADKI 1987, PROB 1997, RADAJ 1999]).

Die Güte des Wärmeleitmodells im Bereich der Schweißstelle hängt entscheidend von der gewählten Wärmequellenverteilung ab. Konzentrierte Wärmequellen sind im Allgemeinen als unzureichend anzusehen, da sie im Gegensatz zu verteilten Wärmequellen keine Kalibrierung des Simulationsmodells z.B. an dem Schmelzzonenquerschnitt oder den Temperaturzyklen in der WEZ erlauben (RADAJ 1999). Des Weiteren ist für die Simulation von höherenergetischen Schweißverfahren eine Verwendung von Modellen mit einer Wärmeverteilung an der Werkstückoberfläche nicht zutreffend, da die Wärmeerzeugung auch in den Tiefen des Schmelzbades stattfindet (RADAJ 1999). Um diesem Manko zu begegnen, wurde für die numerische Simulation des Schweißprozesses eine normalverteilte, doppelellipsoide Volumenwärmequelle nach GOLDAK [1985] zur Simulation des Wärmeeintrages verwendet, siehe Abb. 7.6. GOLDAK approximiert den räumlichen MAG-Lichtbogenwärmestrom q_{VOL} durch eine räumliche Wärmestromdichteverteilung in Form einer Exponentialfunktion (Gauß-Normalverteilung) in x-, y- und z-Richtung. Im Mittelpunkt des Ellipsoids liegt hierbei das elektrodenfeste Koordinatensystem. Zur Beschreibung des Ellipsoids dienen die Schmelzbadgrenzen, welche über die Halbachsen $x_{0,05}$, $y_{0,05}$, $z_{0,05}$ definiert werden. Diese verlaufen parallel zu den Achsen des Koordinatensystems x, y, z.

$$q_{VOL}(x, y, z) = q_{MAG}^* \cdot e^{-A \cdot x^2} \cdot e^{-B \cdot y^2} \cdot e^{-C \cdot z^2} \quad (7.34)$$

q_{MAG}^* maximale Wärmestromdichte im Lichtbogenzentrum

A, B, C Konstanten zur Beschreibung der Glockenkurvenform (Steigung, Breite)

Durch Integration der Wärmestromdichte aus Gl. (7.34) über den Raum ergibt sich die durch den Lichtbogen (unter Berücksichtigung von Verlusten) zugeführte Wärmeleistung.

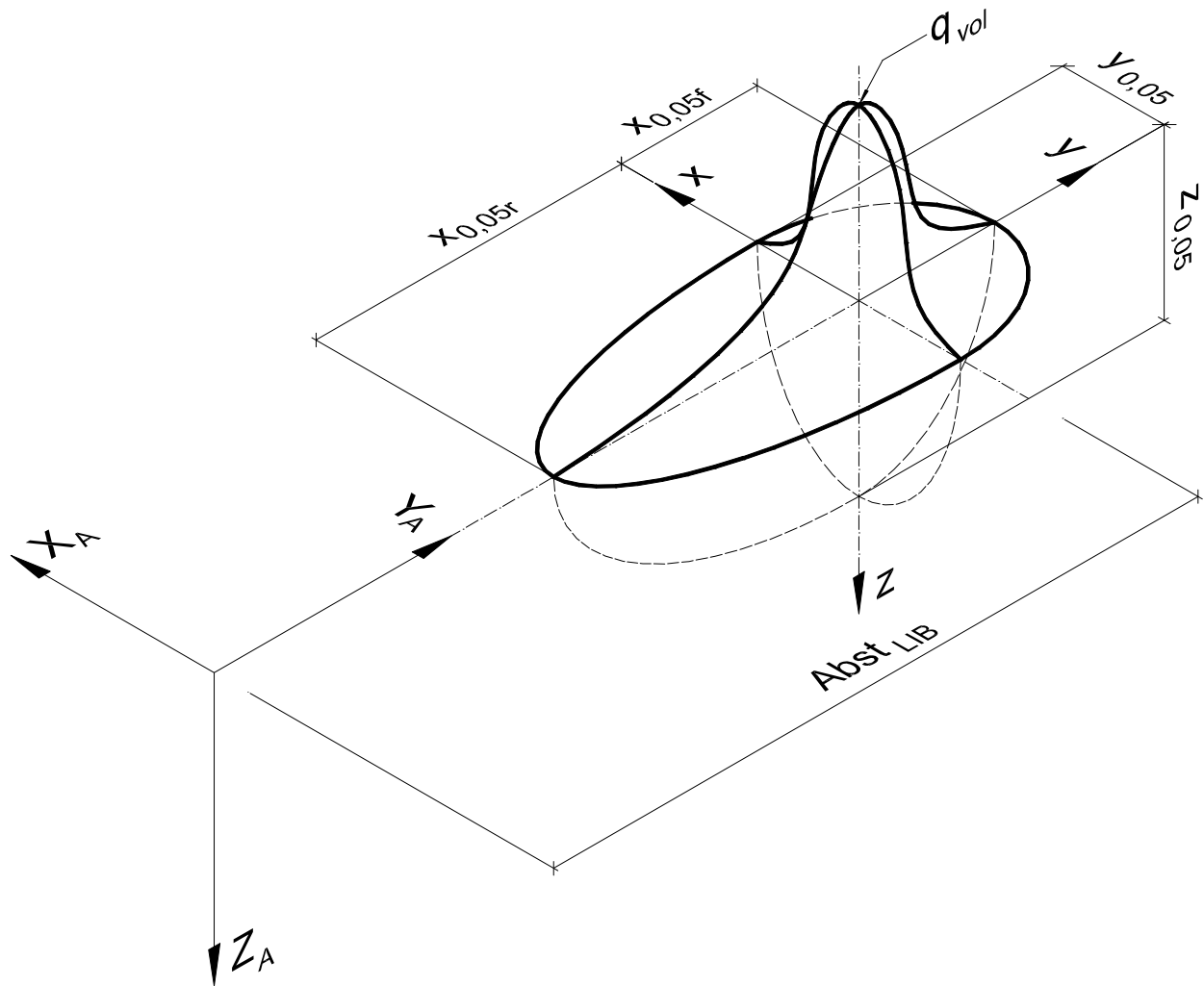


Abb. 7.6 Skizze des Lichtbogenmodells nach GOLDAK mit elektrodenfestem und raumfesten (Ansys®-Bezug) Koordinatensystem

$$2\dot{Q} = 2\eta UI = 8 \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty q_{MAG}^* \cdot e^{-A \cdot x^2} \cdot e^{-B \cdot y^2} \cdot e^{-C \cdot z^2} dx d\xi dz \quad (7.35a)$$

$$= 8 \cdot q_{MAG}^* \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{A}} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{B}} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{C}} \quad (7.35b)$$

$$= \frac{q_{MAG}^* \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}}{\sqrt{ABC}} \quad (7.35c)$$

Eine genauere Betrachtung der Gl. (7.35) lässt erkennen, dass die zugeführte Wärmeleistung \dot{Q} doppelt berücksichtigt wird. Dieses Vorgehen erklärt RYKALIN [1957] durch die einseitige Begrenzung des der Betrachtung zugrunde liegenden Schweißkörpers. In einem unbegrenzten Körper verläuft die Wärmeausbreitung in alle Richtungen des Raumes gleich. Im einseitig begrenzten (halbunendlichen) Körper wird hingegen, durch die isothermischen Verhältnisse an der Oberfläche XOY , der Ausbreitungsvorgang beeinflusst, vgl. Abb. 7.7. Die von GOLDAK formulierte Gleichung unterstellt, dass die Oberfläche im Bereich des Schweißlichtbogens wärmeundurchlässig ist. RYKALIN führt zur Darstellung dieser Grenz-(Rand-)bedingung eine zusätzliche Wärmequelle Q' ein. Diese entspricht in Größe und Abstand von der Oberfläche der ursprünglich vorhandenen Wärmequelle Q , wobei die neu eingeführte Wärmequelle spiegelbildlich zur ursprünglichen angeordnet wird. Symmetrie- und damit Spiegelachse ist die Oberfläche XOY . Aufgrund des symmetrischen Verlaufes der Wärmeausbreitung infolge der beiden Wärmequellen, sind die normal zu dieser Ebene gerichteten Komponenten der Wärmestromdichte an jedem Punkte der Ebene XOY gleich groß und entgegengesetzt gerichtet. Daraus folgt die Summe der Wärmeströme zu Null, was auch für den Temperaturgradienten gilt. An der Grenzfläche XOY liegt somit eine adiabate Lagerung vor. Wird die Wärmequelle zur wärmeundurchlässigen Oberfläche verschoben, so muss die Spiegelquelle sich ebenfalls der Oberfläche im gleichen Maße annähern, um die Ausbreitung in einem unendlichen Raum mit der im halbunendlichen Raum gleichzusetzen. Im Grenzfall der oberflächlichen Wärmeeinbringung fallen die reale sowie die spiegelbildlich re-

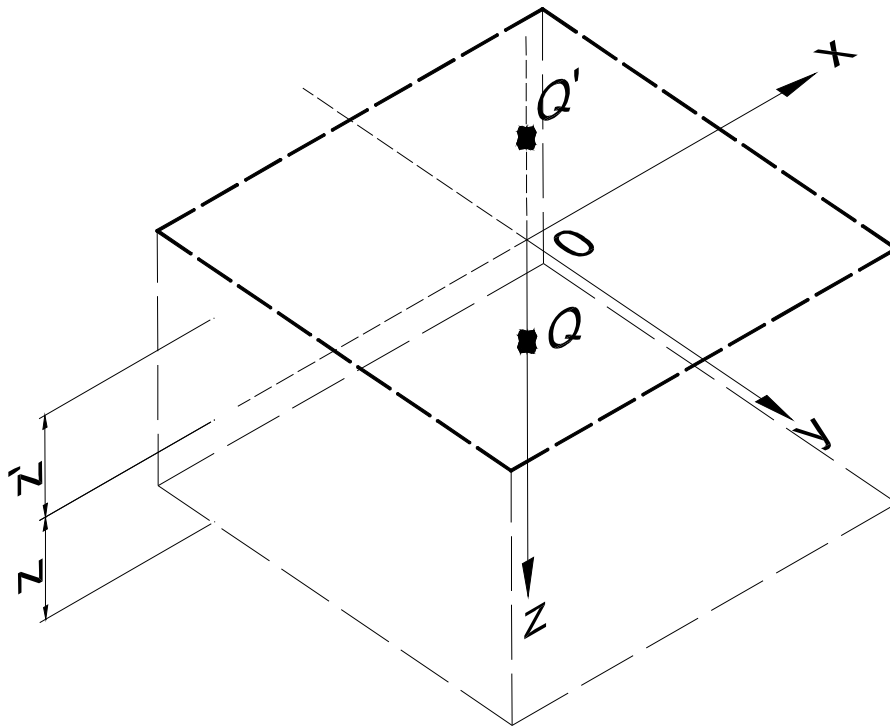


Abb. 7.7 Definition der adiabaten Lagerung durch gespiegelte Wärmequelle

flektierende Quelle zusammen, was dazu führt, dass die Wärmeeinbringung zu $2\dot{Q}$ gesetzt wird (siehe auch [Ryka 1957, Gold 1984, Radaj 1999]). Die Multiplikation des Dreifachintegrals mit 8 resultiert aus der Überlegung, dass es sich bei der Wärmequelle um ein Rotationsellipsoid handelt, welcher aus 8 Teilen räumlich zusammengesetzt ist. Die Subvolumina entstehen durch die Integration über die Halbachsen.

Für die Auflösung der Gl. (7.35c) nach der maximalen Wärmestromdichte im Schweißlichtbogen q_{MAG}^* ergibt sich:

$$q_{MAG}^* = \frac{2 \cdot \dot{Q} \cdot \sqrt{ABC}}{\pi \sqrt{\pi}} \quad (7.36)$$

Eine Auswertung der Gl. (7.34) und (7.36) lässt erkennen, dass sich die Funktionswerte der Wärmestromdichte asymptotisch gegen Null annähern. Zur Verringerung des Rechenaufwandes bei der Integration sowie zur Bestimmung der Konstanten A, B, C sind Annahmen für den Integrationsbereich zu treffen. Diese Integrationsgrenzen legt GOLDAK durch die Wahl einer kleinsten zu berücksichtigenden Wärmestromdichte fest. Als Grenze der zu berücksichtigenden Wärmestromdichte werden die im Schrifttum vorgeschlagenen 5% der maximalen Wärmestromdichte q_{MAG}^* übernommen (siehe auch [GOLD 1985, RADAJ 1999]).

$$q_{VOL}(x_{0,05}, 0, 0) = q_{MAG}^* \cdot e^{-A \cdot x_{0,05}^2} = 0,05 \cdot q_{MAG}^* \quad (7.37a)$$

$$q_{VOL}(0, y_{0,05}, 0) = q_{MAG}^* \cdot e^{-B \cdot y_{0,05}^2} = 0,05 \cdot q_{MAG}^* \quad (7.37b)$$

$$q_{VOL}(0, 0, z_{0,05}) = q_{MAG}^* \cdot e^{-C \cdot z_{0,05}^2} = 0,05 \cdot q_{MAG}^* \quad (7.37c)$$

Die Auflösung nach den Konstanten ergibt:

$$A = \frac{\ln 20}{x_{0,05}^2} \approx \frac{3}{x_{0,05}^2} \quad (7.38a)$$

$$B = \frac{\ln 20}{y_{0,05}^2} \approx \frac{3}{y_{0,05}^2} \quad (7.38b)$$

$$C = \frac{\ln 20}{z_{0,05}^2} \approx \frac{3}{z_{0,05}^2} \quad (7.38c)$$

Für die numerische Simulation orientieren sie die Parameter $x_{0,05}$, $y_{0,05}$, und $z_{0,05}$ an den Abmessungen des Schweißschmelzbades. Zur Bestimmung der Schmelzbadabmessungen wurde in fünf Versuchen die Schmelzbadform durch Ausblasen der Schweißschmelze mittels Luftdruck kurz vor dem Erlöschen des Lichtbogens bestimmt. Durch Einsetzen der Gl. (7.36) und (7.38) in Gl. (7.34) ergibt sich nach Goldak die räumliche Wärmestromdichteverteilung für eine halbellipsoide Volumenquelle mit Gausverteilung zu:

$$q_{vol}(x, y, z) = \frac{2\dot{Q} \sqrt{\frac{3}{x_{0,05}^2 y_{0,05}^2 z_{0,05}^2}}}{\pi \sqrt{\pi}} \cdot e^{-\frac{3x^2}{x_{0,05}^2}} \cdot e^{-\frac{3y^2}{y_{0,05}^2}} \cdot e^{-\frac{3z^2}{z_{0,05}^2}} \quad (7.39a)$$

$$= \frac{6\dot{Q}\sqrt{3}}{\pi \sqrt{\pi} x_{0,05} y_{0,05} z_{0,05}} \cdot e^{-\frac{3x^2}{x_{0,05}^2}} \cdot e^{-\frac{3y^2}{y_{0,05}^2}} \cdot e^{-\frac{3z^2}{z_{0,05}^2}} \quad (7.39b)$$

Bei Betrachtung der Schmelzbadgeometrie während des Schweißprozesses fällt auf, dass die Badgeometrie und damit die Wärmequellendichteverteilung in Schweißrichtung unsymmetrisch ist. Infolge der Brennerbewegung über dem Werkstück wird die vordere Schmelzbadhälfte gestaucht, wohingegen der nachlaufende Bereich der Schmelze eine gestreckte Form aufweist. Zur Berücksichtigung dieses Sachverhaltes wird die Volumenquelle in ein vorderes und hinteres Viertelellipsoid unterteilt, denen der jeweilige prozentuale Anteil an dem Gesamtwärmeeintrag zugewiesen wird, vgl. Abb. 7.6 sowie Gl. (7.40a) und (7.40b). Für die Aufteilung werden die Wichtungsfaktoren f_f (Index f = front) und f_r (Index r = rear) eingeführt.

$$q_{vol f}(x, y, z) = f_f \frac{6\dot{Q}\sqrt{3}}{\pi \sqrt{\pi} x_{0,05f} y_{0,05} z_{0,05}} \cdot e^{-\frac{3x^2}{x_{0,05f}^2}} \cdot e^{-\frac{3y^2}{y_{0,05}^2}} \cdot e^{-\frac{3z^2}{z_{0,05}^2}} \quad (7.40a)$$

$$q_{vol r}(x, y, z) = f_r \frac{6\dot{Q}\sqrt{3}}{\pi \sqrt{\pi} x_{0,05r} y_{0,05} z_{0,05}} \cdot e^{-\frac{3x^2}{x_{0,05r}^2}} \cdot e^{-\frac{3y^2}{y_{0,05}^2}} \cdot e^{-\frac{3z^2}{z_{0,05}^2}} \quad (7.40b)$$

Zur Gewährleistung, dass die Gesamtwärmeleistung der Teilellipsoide der Leistung einer symmetrischen Verteilung entspricht, ist zu beachten, dass die Summe der Wichtungsfaktoren sich zu 2 ergeben muss (siehe auch [GOLD 1984, NGUY 1999, RADAJ 1999]). Als weiteres Kriterium wird von NGUYEN [1999] die Gleichheit der Wärmequellendichte im Ursprungspunkt der Volumenquelle gefordert. Unter Berücksichtigung der genannten Randbedingungen ergibt sich für die Wichtungsfaktoren:

$$f_f = \frac{2x_{0,05f}}{x_{0,05f} + x_{0,05r}} \quad (7.41a)$$

$$f_r = \frac{2x_{0,05r}}{x_{0,05f} + x_{0,05r}} \quad (7.41b)$$

Die von Goldak entwickelten Gleichungen zur Simulation des Wärmeintrags setzen ein elektrodenfestes und damit dem Lichtbogen folgendes Koordinatensystem voraus. Für die Eingabe in die numerische Simulation (Ansys®) ist dies jedoch aus programmtechnischen Gründen wenig vorteilhaft. Dies gilt insbesondere, wenn infolge des Schweißprozessfortschrittes Nahtelemente in eine bestehende Struktur eingebaut werden sollen. Zur Lösung dieses Problems wurde daher ein lokales Koordinatensystem am Nahtanfang in die Symmetrieachse gelegt, für das die einzelnen Elementknotenkoordinaten bestimmt werden. Mittels Koordinatentransformation werden die Knotenkoordinaten auf das fiktiv mitwandernde Elektrodenkoordinatensystem umgerechnet und in die Gl. (7.40) eingesetzt.

Für die Transformation gilt:

$$x = X_A \quad (7.42a)$$

$$y = Y_A - Abst_{LIB} = Y_A - v \cdot t \quad (7.42b)$$

$$z = Z_A \quad (7.42c)$$

X_A, Y_A, Z_A	Elementknotenkoordinaten mit Bezug auf das ortsfeste Ansys-Koordinatensystem
v	Schweißgeschwindigkeit
t	aktuelle Schweißzeit

7.2.5 Aufbringen der thermischen Belastung und Lösung

Die Belastung des numerischen Modells erfolgt durch eine Zuweisung von Wärmeströmen an den Elementknotenpunkten, welche aus den Gl. (7.40a) und (7.40b) bestimmt werden. Zur Simulation des Schweißprozesses werden zunächst alle Elemente des Nahtvolumens inaktiv geschaltet und mit der virtuellen Bewegung des Schweißlichtbogens (Volumenwärmequelle) aktiviert, siehe Abb. 7.8 und 7.9. Diese im FE-Programm Ansys® implementierte „Birth and Death“-Funktion bewirkt ein Zurücksetzen der Elementsteifigkeit innerhalb der Steifigkeitsmatrix des Programms, d.h. die Elementsteifigkeit wird gegen Null gesetzt. Mit der Elementaktivierung erhält das betreffende Element seine Ausgangssteifigkeit in der Matrix zurück, so dass diese innerhalb der Berechnung eine signifikante Berücksichtigung findet. Das zeitlich versetzte Aktivieren der Elemente

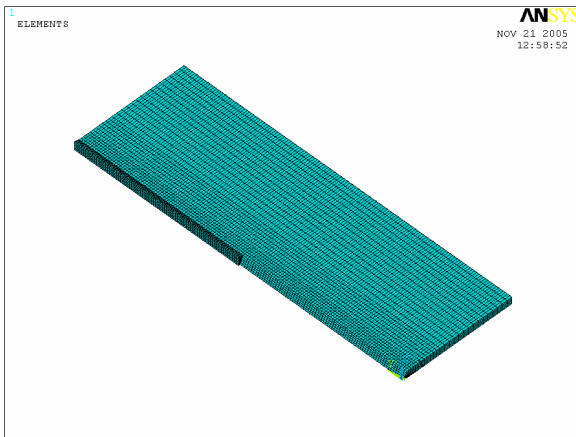


Abb. 7.8 Virtuelles Probenblech $t=6$ mm mit teilweise deaktivierter Schweißnaht

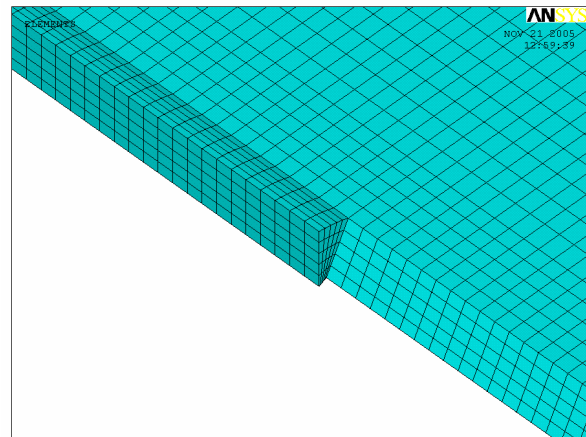


Abb. 7.9 Vorderer Bereich der aktivierten Schweißnaht

simuliert den Eintrag des Schweißgutes in den Nahtspalt und erfolgt in Abhängigkeit der vorgegebenen Schweißgeschwindigkeit. Diese orientierte sich für die numerische Simulation an den durchgeführten Schweißversuchen und wurde mit 27,5 cm/min angesetzt. Bei einer virtuellen Nahtlänge von 30 cm und 150 Elementen in Schweißrichtung erfolgt eine Nahtelementaktivierung alle 0,43 sec. Die Verschiebung des virtuellen Lichtbogens erfolgt in 10 Teilschritten pro Element, so dass sich als Zeitschrittweite ein Wert von ungefähr 0,04 sec ergibt. Diese sehr kleine Zeitschrittweite hat den Vorteil der Vermeidung sprunghafter Änderungen der Kontenwärmeströme am finiten Element, welche aus dem örtlich begrenzten Wärmeeintrag des virtuellen Schweißlichtbogens resultieren. In folge dieses Vorgehens sind weniger Gleichgewichtsiterationen notwendig, was zur Stabilität des Lösungsprozesses beiträgt. Als virtuelle Schweißparameter wurden die während der Schweißversuche gemessenen Größen übernommen ($U = 22,5$ V; $A = 165$ A). Der Wirkungsgrad wurde in Ermangelung genauerer Kenntnis mit 0,9 abgeschätzt und liegt damit im Bereich der in der Literatur zu findenden Größen, vgl. (RYKA [1957], EICH [1972], RÖBE [1977], ADKI [1987], PROB [1997], RADAJ [1999]). Für eine genauere Angabe des Wirkungsgrades sind kalorimetrische Messungen unumgänglich.

7.2.6 Vergleich Simulation und Messung

Zur Überprüfung und Verifikation des numerischen Modells wurden Temperaturmessungen an Schweißproben mittels Thermoelementen NiCr-Ni (Typ K), 2 x Durchmesser 0,5 mm durchgeführt. Die Datenerfassung erfolgte mittels eines Vielstellenmeßgerät (Abb. 7.10) vom Typ HP34970A[®] mit eingebautem Modul HP34902A[®] der Firma Hewlett Packard sowie eines Laptops mit Datenloggersoftware HP Benchlink[®]. Abb. 7.11 zeigt die auf die Probe applizierten Thermoelemente vor und nach dem Schweißversuch.

Der direkte Vergleich zwischen den punktuellen Temperaturmessungen im Schweißversuch und dem Ergebnis der numerischen Simulation liefert eine sehr gute



Abb. 7.10 Vielstellenmeßgerät mit Laptop

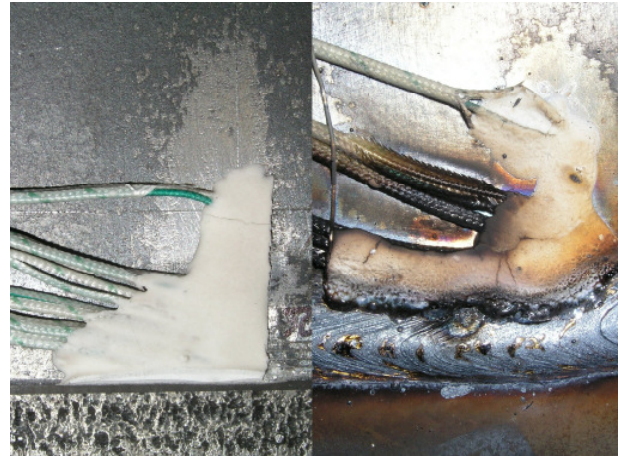


Abb. 7.11 Applizierte Thermoelemente vor und nach dem Schweißversuch

Übereinstimmung und spiegelt die hohe Qualität des numerischen Modells wider. Wie aus der Abb. 7.12 zu erkennen, weisen die transienten Temperaturverläufe aus Messung und Simulation nur geringfügige Abweichungen auf. Eine genauere Betrachtung lässt erkennen, dass mit größer werdender Distanz zur Kante der Nahtvorbereitung (Schweißnaht) die Spitzenwerte der Temperaturkurven als auch das Abklingverhalten der Temperatur nahezu identisch sind.

Abb. 7.14 zeigt die flächenartige Temperaturverteilung im virtuellen Bauteil nach rd. 32,5 sec Schweißzeit. Deutlich zu erkennen ist der Bereich des Wärmeeintrags durch den Schweißlichtbogen sowie die, in Form einer Heckwelle, dem Schweißbad nachlaufende Wärmefront. Die zu diesem Zeitpunkt maximal vorherrschende Temperatur liegt bei rd. 2178 °C und entspricht damit den in der Literatur (z.B. Probst [1997]) zu findenden Angaben. Eine Überhitzung des Schmelzbades tritt nicht auf. Eine Vergrößerung des Bereiches der Wärmeinbringung durch den Schweißlichtbogen (Abb. 7.13) lässt deutlich die Geometrie des Schweißschmelzbades erkennen. Als unzutreffend numerisch abgebildet muss der frontseitig des Schmelzbades befindliche Wurzelbereich angesehen werden, welcher eine minimale Temperatur von 960 °C aufweist. Diese Unterschätzung zeigt die Schwäche der GOLDAKSchen Volumenwärmequelle, welche hauptsächlich für Auftragschweißungen konzipiert worden ist. In Betracht des Ergebnisses der numerischen Temperaturermittlung für die restlichen Bauteilbereiche ist dieser Fehler jedoch als vertretbar anzusehen.

Die numerische Simulation wurde bis zu einem fiktiven Zeitpunkt von 100 sec nach dem Beginn der virtuellen Schweißung durchgeführt, so dass die Möglichkeit der numerischen $t_{8/5}$ -Zeit-Bestimmung gegeben ist. Aus der Abb. 7.15 ist der Fortgang der gleichmäßigen Bauteildurchwärmung nach Beendigung des Schweißprozesses zu erkennen. Das Bauteil weist nunmehr eine Spitzentemperatur von rd. 516 °C auf.

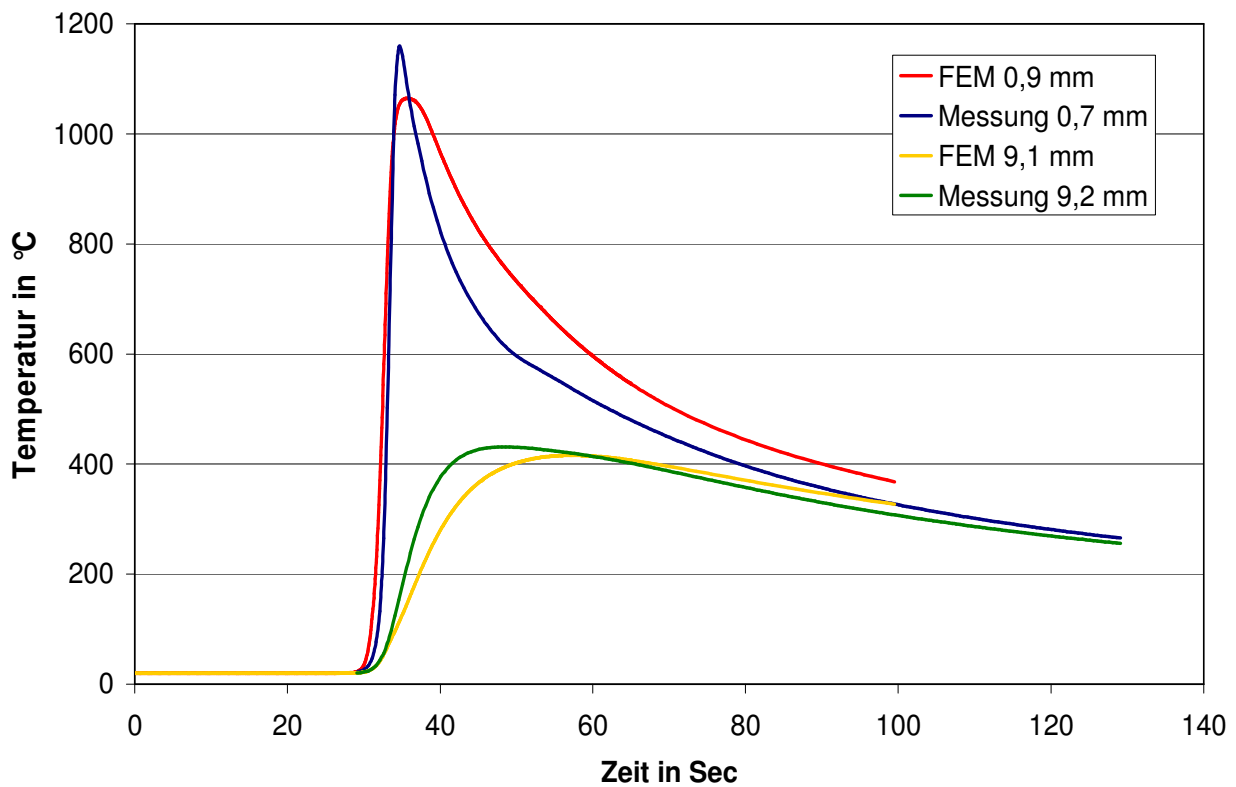


Abb. 7.12 Gegenüberstellung der Temperaturverläufe aus Messung und FE-Rechnung, Blechstärke $t=6$ mm

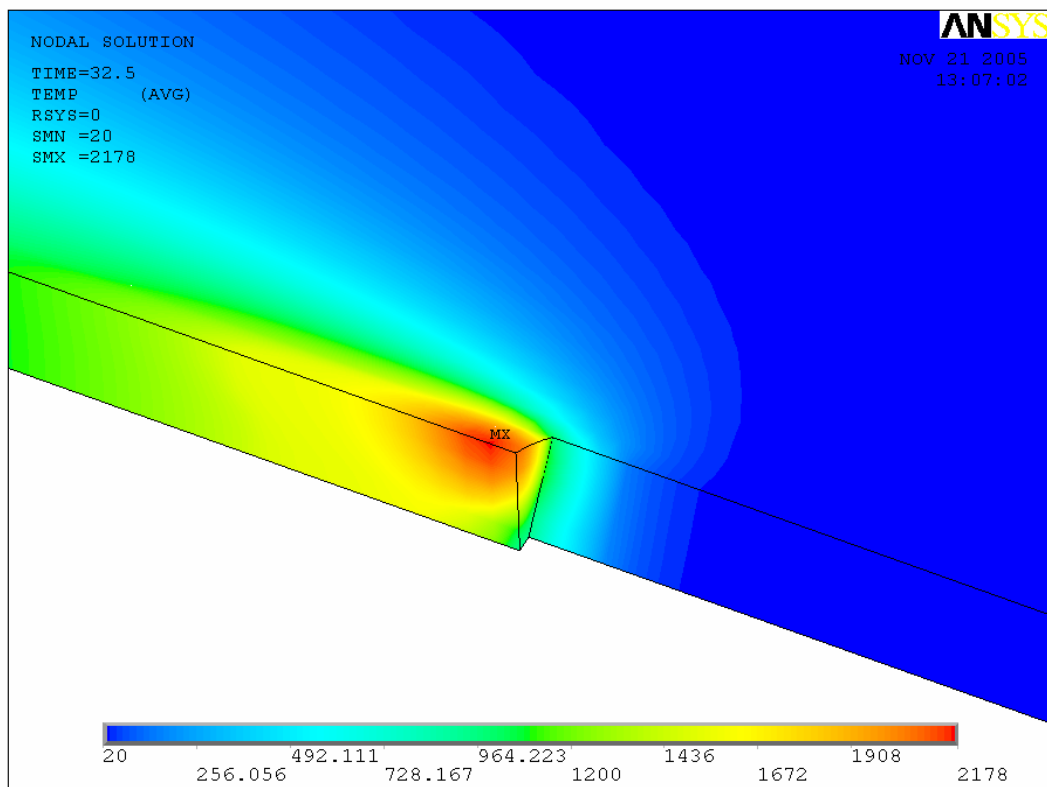


Abb. 7.13 Temperaturverlauf im Bereich des Lichtbogens zum Zeitpunkt $T=32,5$ sec, Blechstärke $t=6$ mm

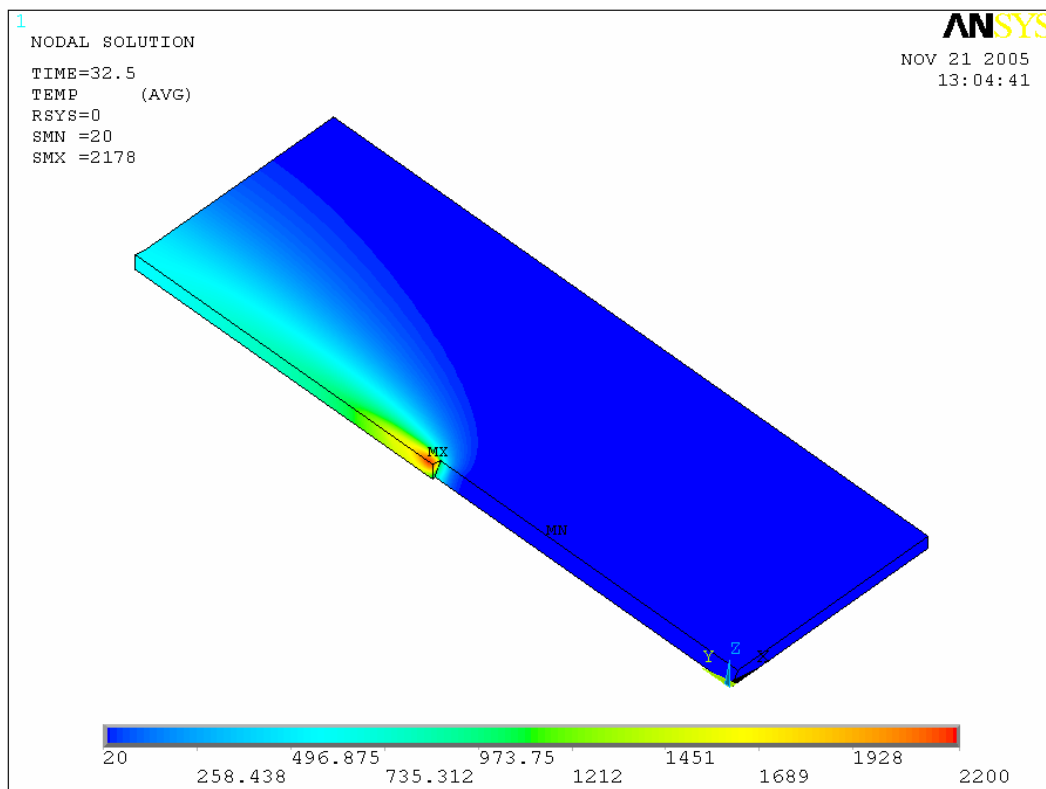


Abb. 7.14 Temperaturverlauf im Bauteil zum Zeitpunkt $T=32,5$ sec, Blechstärke $t=6$ mm

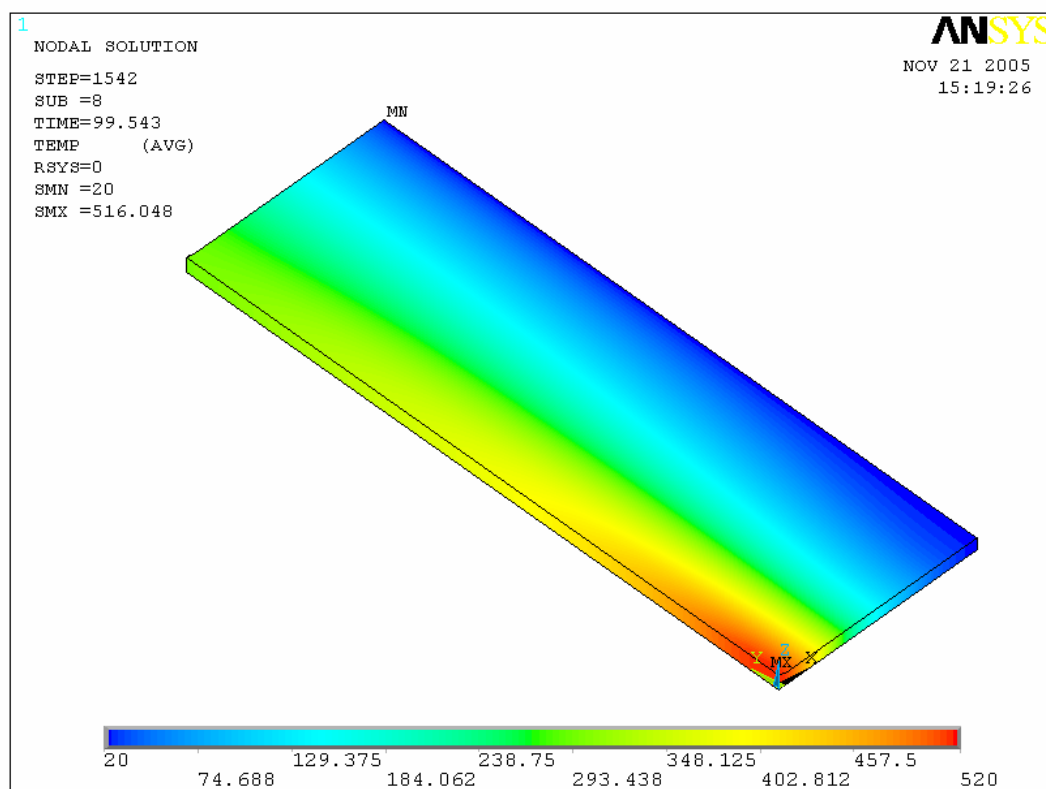


Abb. 7.15 Temperaturverlauf im Bauteil zum Zeitpunkt $T=99,5$ sec, Blechstärke $t=6$ mm

7.3 Strukturmechanische Berechnung

Die im Anschluss an die thermische Analyse des Schweißprozesses durchgeführte strukturmechanische Untersuchung dient der numerischen Simulation der während und nach dem Schweißprozess auftretenden Kräfte und Spannungen im Bauteil. Grundlage der strukturmechanischen Betrachtung bilden die bekannten Gleichungen der Statik und technischen Mechanik. Auf eine ausführliche Darstellung wird an dieser Stelle verzichtet und auf die einschlägige Literatur verwiesen (Ahre [1994, 1996], Bathe [2002]).

7.3.1 Allgemeine Voraussetzungen

Geometrie und Diskretisierung des virtuellen Bauteils wurden aus der numerischen Temperaturfeldberechnung übernommen. Für die Berechnung zusätzlich erforderliche Werkstoffkennwerte entsprechen den Angaben des Kapitels 6. Aufgrund der fehlenden Möglichkeit der Eingabe eines geschwindigkeitssensitiven Werkstoffverhaltens erfolgte die Berücksichtigung des temperaturabhängigen Spannungs-Dehnung-Verhalten des Werkstoffes durch die Verwendung des in Ansys® integrierten „*Multilinear-kinematic-hardening*“-Werkstoffmodells (KINH®). Grundlage der Werkstoffmodellierung bilden die Warmzugversuche bei der Normgeschwindigkeit nach DIN EN 10002-5. Dieser werkstoffliche Simulationsansatz scheint aufgrund der geringen Geschwindigkeitsauswirkungen im Hochtemperaturbereich vertretbar.

Der vorhandene Temperaturelementtyp SOLID 70® wurde gegen den Strukturelementtyp SOLID 45® ausgetauscht. Das SOLID 45®-Element ist ein Volumenelement mit 8 Knoten, wobei jeder Knoten 3 translatorische Freiheitsgrade (u_x , u_y , u_z) besitzt. Die Ansatzfunktionen des Elementes sind linear. Zur Verbesserung der Ergebnisqualität besitzt das SOLID 45®-Element triquadratische Zusatzfunktionen („extra displacement shapes“), welche separat aktiviert werden können. Der mathematische Zusammenhang geht jedoch nicht eindeutig aus dem „Theory Manual“ des FE-Programms Ansys® hervor. Nachteilig wirkt sich diese Zusatzfunktion bei starken Verzerrungen der Elemente aus. Dies begründet sich in einer größeren Instabilität des Solution-Prozesses, weshalb auf den Einsatz verzichtet worden ist. Ferner bewirkt eine Aktivierung der Extra-Displacement-Shapes eine Nichtkompatibilität der Elemente untereinander, d.h. es kommt zum Auftreten von Spalten und Überlappungen entlang der Elementkanten.

7.3.2 Mechanische Randbedingungen

Zur Reduktion der Rechenzeit wurde die Symmetrie des Versuchskörpers ausgenutzt. Der virtuelle Versuchskörper weist entlang der Symmetrieachse (Schweißnaht) eine einwertige Lagerung (horizontale Halterung) auf. Im Bereich der Probenhalterung durch den Lagerschlitten, wird diese durch eine dreiwertige Lagerung in Richtung der drei Raumachsen simuliert. Aufbau und Kennzeichnung der einzelnen Volumenabschnitte sind der Abb. 7.2 zu entnehmen.

7.3.3 Aufbringen der Belastung und Lösung

Das Aufbringen der mechanischen Belastung auf das numerische Modell erfolgt durch die stirnseitige Einprägung einer zeitlich veränderlichen Verschiebung der Lagerungsknoten im Bereich der virtuellen Probenhalterung. Der aufgeprägte Bewegungsverlauf ist sinusförmig. Die Größe der Bewegungsamplitude bzw. die Bewegungsfrequenz orientieren sich dabei an den durchgeführten Schweißversuchsparametern. Abb. 7.16 zeigt den exemplarischen Verlauf der Lagerbewegung für eine virtuelle Bewegungsamplitude von $\pm 0,3$ mm und einer Frequenz von 1,0 Hz im Zeitbereich von 30 bis 35 sec. Es muss angemerkt werden, dass aus Gründen der Symmetrie nur die halbierte Bewegungsamplitude des Schweißversuches für die numerische Simulation zu verwenden ist. Die dargestellte Bewegungsamplitude $\pm 0,15$ mm innerhalb der Simulation entspricht somit dem experimentellen Vorgehen im Schweißversuch für eine Amplitude von $\pm 0,3$ mm (Wegregelung). Um eine numerisch stabile Lastaufbringung zu gewährleisten, wurde der vorgegebene sinusförmige Verlauf in einzelne Last-/Bewegungsabschnitte unterteilt, wobei sich ein Zeitinkrement von 0,025 Sekunden bei größeren Bewegungsamplituden bewährt hat.

Neben der mechanischen Beanspruchung erfährt das Bauteil eine thermische Belastung infolge des Schweißprozesses. Um die strukturmechanischen Auswirkungen der thermischen Beanspruchung zu berücksichtigen, wird das transiente Temperaturfeld der thermischen Analyse zeitrichtig als zusätzliche Belastung auf das strukturmechanische Modell aufgebracht. Das Auslesen der thermischen Daten erfolgt parallel zur mechanischen Lastaufbringung.

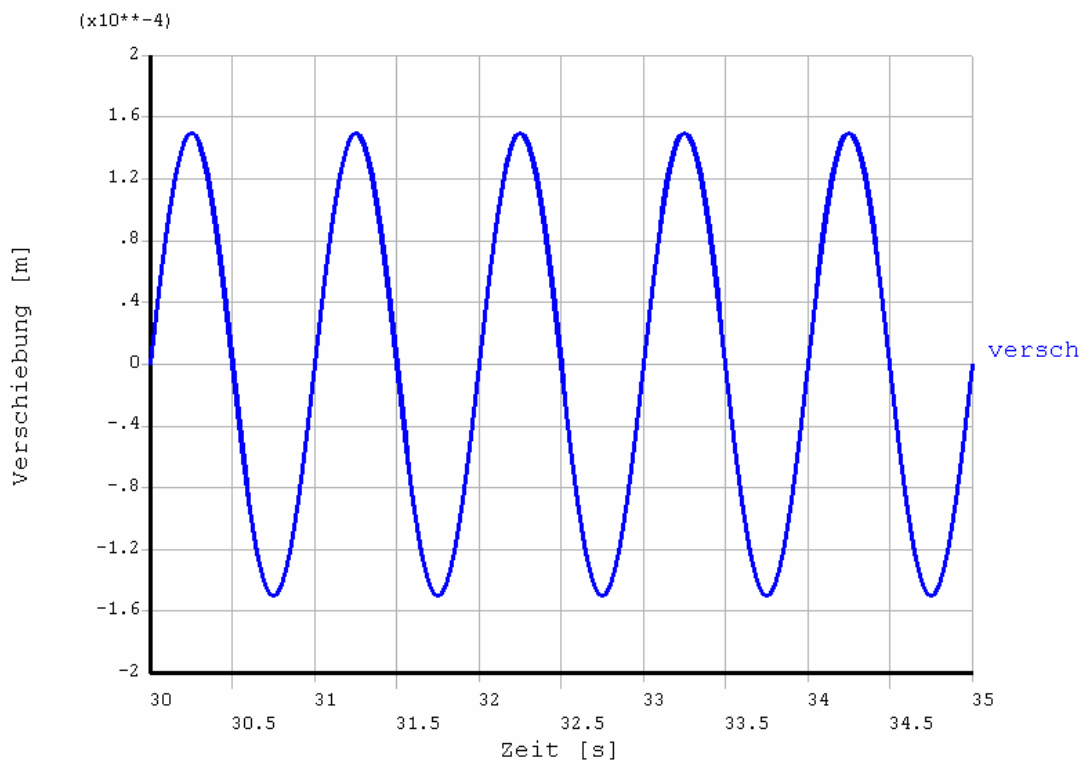


Abb. 7.16 Virtuelle Lagerverschiebung für eine Bewegungsfrequenz von 1 Hz und einer Amplitude von $\pm 0,30$ mm (Symmetrie)

Analog zum Vorgehen der transienten Temperaturfeldsimulation erfolgt die Simulation des Schweißprozesses durch virtuellen Einbau von Schweißnahtelementen. Die Aktivierung der einzelnen Nahtelemente erfolgt in zeitlicher Abhängigkeit des virtuellen Schweißfortschrittes bzw. der vorgegebenen Schweißgeschwindigkeit.

An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass aufgrund der geometrischen und werkstofflichen Nichtlinearitäten, unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit, eine erhöhte Anforderung an die Computerhardware besteht. Der numerische Lösungsprozess für die komplette Simulation der strukturellen sowie thermischen Vorgänge benötigte auf einer Workstation, welche mit einem 2,8 GHz XENON[®]-Prozessor und 3 GB Hauptspeicher ausgestattet war, rund 3,5 Wochen.

7.3.4 Darstellung der Simulationsergebnisse

Der nachfolgenden exemplarischen Darstellung der Simulationsergebnisse liegt eine experimentelle Bewegungsamplitude von $\pm 0,3$ mm sowie eine Bewegungsfrequenz von 1,0 Hz zugrunde. Geometrie und Nahtform entsprechen den in Abb. 7.2 dargestellten Angaben. Beispielhaft werden die Ergebnisse der Simulation zur Mitte der Schweißung sowie zum Ende diskutiert.

Zum Zeitpunkt $T=31,25$ sec ergibt sich die rechnerische Spannungsverteilung gemäß den Abb. 7.17 bis 7.20. Es liegt der maximale positive Ausschlag der Bewegungsamplitude vor (Zug), vgl. Abb. 7.16. Die in x-Richtung (parallel zur Beanspruchung) auftretenden Spannungen weisen in den abgeschweißten und erkaltenden Probenbereichen die größten Zugspannungen auf (um 250 N/mm^2). Der Spannungsabfall erfolgt nahezu parallel zur Seitenkante der Probe und erreicht in Höhe des Schweißschmelzbades den Tiefstwert, vgl. Abb. 7.17. In Längsrichtung der Schweißnaht (y-Richtung) kommt es zur Ausbildung eines Druckbogens (Abb. 7.18), der seinen Maximalwert in Höhe des Lichtbogens und den noch zu diesem Zeitpunkt kalten Bereichen neben der Schweißnaht erreicht. Die Spannungsverteilung in Blechdickenrichtung weist keine Besonderheiten auf, siehe Abb. 7.19. Spannungsspitzen in einer Größe von rd. 30 N/mm^2 zeigen sich im Bereich der erkaltenden Schweißnaht. Die sich aus den Spannungs-komponenten ergebende Vergleichspannung nach *von Mises* ist der Abb. 7.20 zu entnehmen. Deutlich zu erkennen ist das nahezu spannungsfreie Schmelzbad im Bereich des einwirkenden Lichtbogens sowie das sich darstellende Zugband, welches sich an die erwärmten Schweißnahtbereiche anschmiegt.

Mit der Umkehrung der Beanspruchungsrichtung ändert sich die Spannungssituation in der virtuellen Probe. Abb. 7.21 bis 7.24 zeigen die Spannungsverteilungen zum Zeitpunkt $T=31,75$ sec. Es liegt der maximale negative Ausschlag der Bewegungsamplitude vor (Druck), vgl. Abb. 7.16. Die in x-Richtung orientierten Spannungen zeigen eine nahezu durchgehende Druckbeanspruchung des Probenbleches. Analog zur vorhergehenden Betrachtung liegt der Bereich der maximalen Beanspruchung im abkühlenden Seitenbereich der Probe, ausgehend vom Startpunkt der Schweißung. Wie aus der Abbildung zu erkennen, unterliegt der Probenrand einer Druckbeanspruchung von rund

380 N/mm². Dieser Wert liegt betragsmäßig oberhalb der sich unter einer positiven Lagerverschiebung ergebenden Zugspannungen, vgl. Abb. 7.17 und 7.21. Die damit verbundene Verschiebung der horizontalen Beanspruchung in den Druckbereich ist somit vergleichbar zu den Ergebnissen der Kräftemessung während der Schweißversuche, siehe Kapitel 3.2.3.1. In Längsrichtung der Schweißnaht kommt es zur Ausbildung eines Druckbogens, welcher sich jedoch, im Vergleich zur positiven Lagerverschiebung, als weniger ausgeprägt darstellt, siehe Abb. 7.22. Der berechnete Spannungsverlauf orientiert sich an der geometrischen Ausbreitungsfigur der heckwellenartig nachlaufenden Wärmefront, vgl. Abb. 7.15. In z-Richtung (Abb. 7.23) weist die auftretende Spannungsverteilung keine Besonderheiten auf. Die auftretenden Druckspannungen überschreiten lediglich punktuell Werte von größer 30 N/mm². Betrachtet man die sich aus den Spannungsponenten ergebende Vergleichsspannungsverteilung nach von Mises (Abb. 7.24), so zeigt sich ein Rückgang in der Ausprägung des Zugspannungsbogens. Im Bereich des Schweißschmelzbades geht die berechnete Spannung gegen Null, große Bereiche der Probe weisen Zugspannungen kleiner 60 N/mm² auf.

Gegen Ende der numerischen Simulation stellt sich die Spannungsverteilung in der virtuellen Blechprobe gemäß den Abb. 7.25 bis 7.28 dar. Die Spannungsverteilung in x-Richtung hat sich in Abhängigkeit der Zeit sowie der Einstellung einer neutralen Lagerposition über die Probenlänge angeglichen, siehe Abb. 7.25. Ein verstärktes Spannungsgefälle vom Beginn zum Ende der Schweißung liegt nicht mehr vor, vgl. Abb. 7.17 mit Abb. 7.25. Der noch wärmere Rand am Ende der Schweißung weist eine Druckbeanspruchung in einer Größenordnung von rd. 150 N/mm² auf, welche u.a. aus der behinderten Wärmeausdehnung dieses Blechbereiches herrühren dürfte. Betrachtet man die Spannungsverteilung in y-Richtung (Schweißnahtlängsrichtung, Abb. 7.26) so zeigt sich, dass die abkühlende Schweißnaht einer Zugbeanspruchung unterworfen ist, welche punktuell im Bereich der Streckgrenze eines S355 liegt. Gestützt wird dieses Zugband durch ein sich einstellendes, wesentlich breiteres Druckgewölbe, welches stellenweise Druckspannungen bis zu einer Größenordnung von 250 N/mm² aufweist. Qualitativ wird dieses Verhalten durch Angaben in der Literatur, z.B. SCHULZE [2003] bestätigt. Analog zu den vorhergehenden Betrachtungen, stellt sich die Spannungsverteilung in Blechdickenrichtung unauffällig dar, siehe Abb. 7.27. Aus der in Abb. 7.28 dargestellten Vergleichsspannungsverteilung ist die Ausbildung von zwei Zugbändern ersichtlich. Das erste Band stellt sich im Bereich der Schweißnaht ein und weist Zugspannungen von rd. 230 N/mm² im Mittel auf. Parallel zur Schweißnaht folgt ein Bereich reduzierter Spannungen, an welchem ein zweites Zugband anschließt. Bemerkenswert ist, dass die gesamte Probe offensichtlich unter einer Zugspannung steht. Dieser Sachverhalt erklärt sich durch die behinderte Schrumpfung der virtuellen Blechprobe. Der sich in Abb. 7.28 darstellende Sachverhalt entspricht der noch im Versuchsrahmen arretierten Schweißprobe. Ein qualitativer Vergleich des Ergebnisses der numerischen Spannungsverteilung mit den sich im Schweißversuch darstellenden Kräften (Abb. 3.4) zeigt, dass es im Verlauf der Abkühlung zu einem Auftreten von Zugkräften kommt, da die Lagerschlitten des Versuchstandes auf die neutrale Ausgangsposition gefahren und hydraulisch dort fixiert wurden. Es bleibt somit zu vermuten, dass eine Freigabe der virtuellen Lagerung

zu einer quantitativ anderen Spannungsverteilung geführt hätte, welche jedoch keine qualitativen Unterschiede aufweisen würde. Des Weiteren muss berücksichtigt werden, dass sich das Ergebnis einer freien Schrumpfung nicht ohne Kommentar auf den Schweißversuch übertragen lässt, da hier die Proben bis zum Ausbau fixiert wurden. Ein Ausbau der Schweißproben erfolgte jedoch erst nach vollständiger Abkühlung. Bis zu diesem Zeitpunkt war es den Schweißproben nicht möglich, sich ungehindert zu verformen, was somit der numerischen Simulation entspricht.

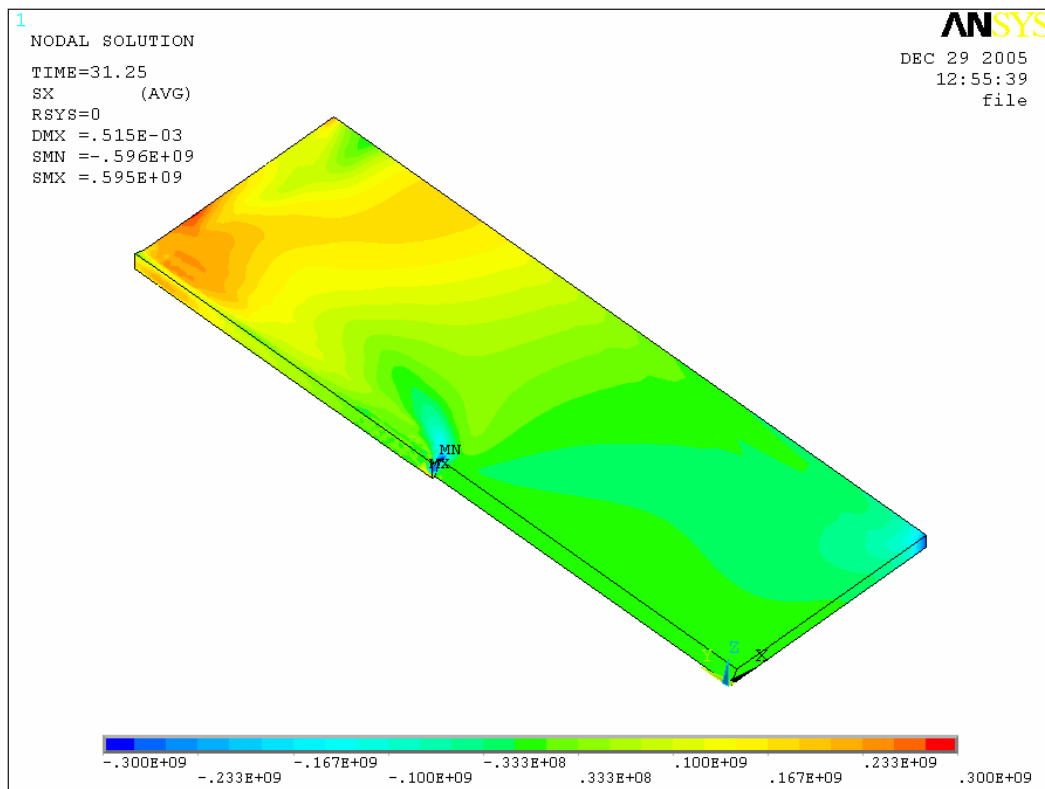


Abb. 7.17 Spannungsverteilung in x-Richtung, Zeit 31,25 sec, Ampl. $\pm 0,03$ mm, Freq. 1,0 Hz

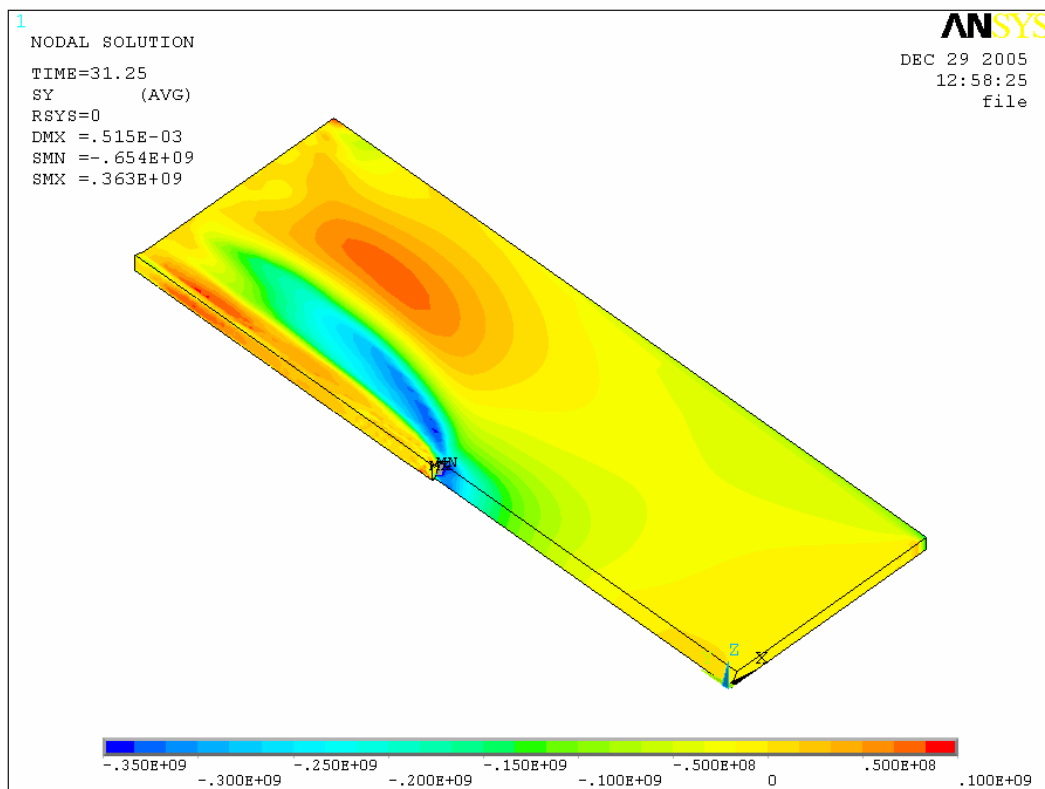


Abb. 7.18 Spannungsverteilung in y-Richtung, Zeit 31,25 sec, Ampl. $\pm 0,03$ mm, Freq. 1,0 Hz

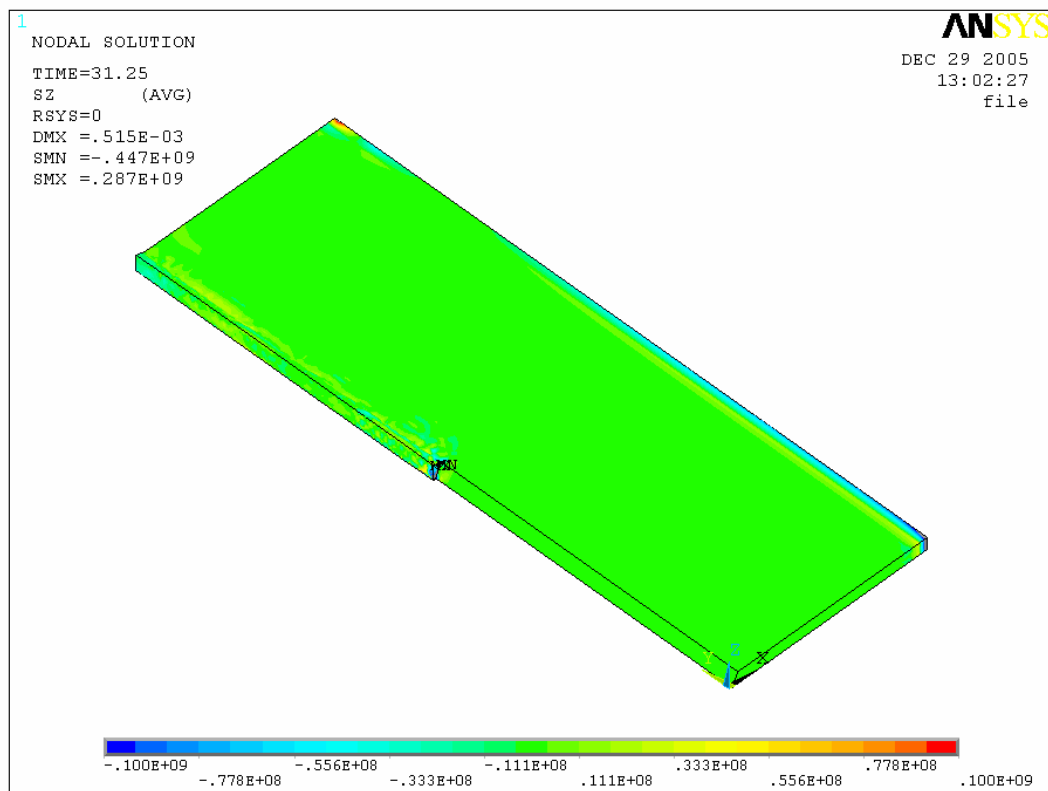


Abb. 7.19 Spannungsverteilung in z-Richtung, Zeit 31,25 sec, Ampl. $\pm 0,03$ mm, Freq. 1,0 Hz

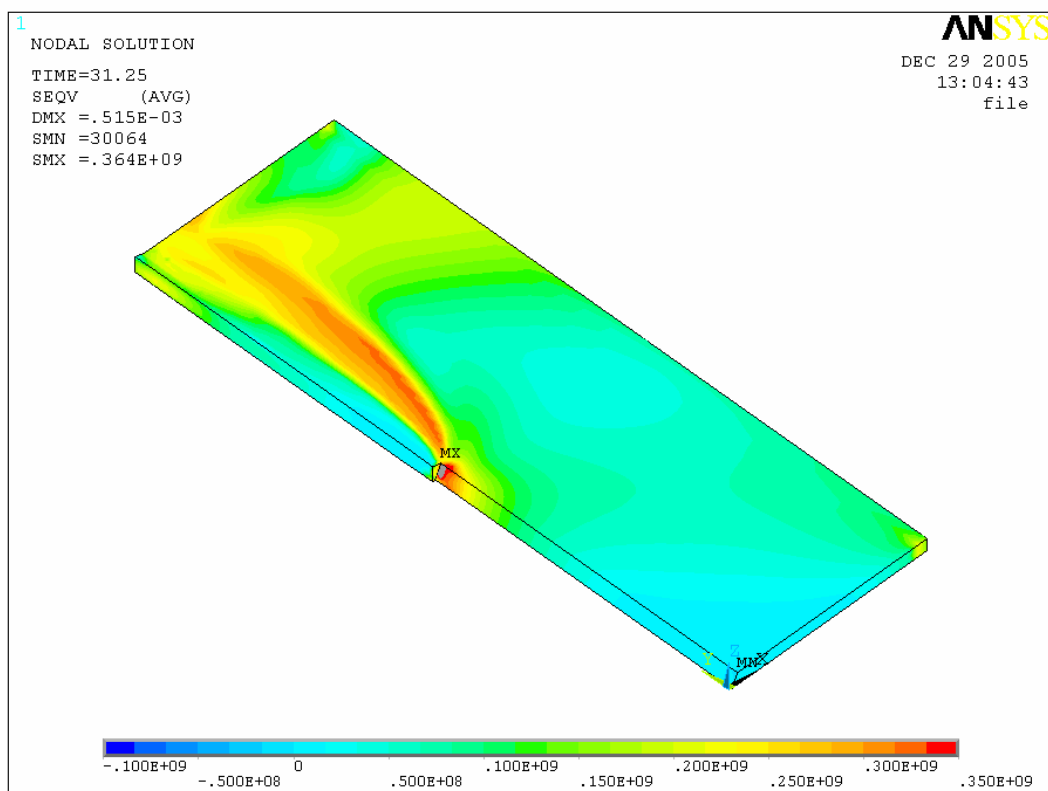


Abb. 7.20 Spannungsverteilung nach von Mises, Zeit 31,25 sec, Ampl. $\pm 0,03$ mm, Freq. 1,0 Hz

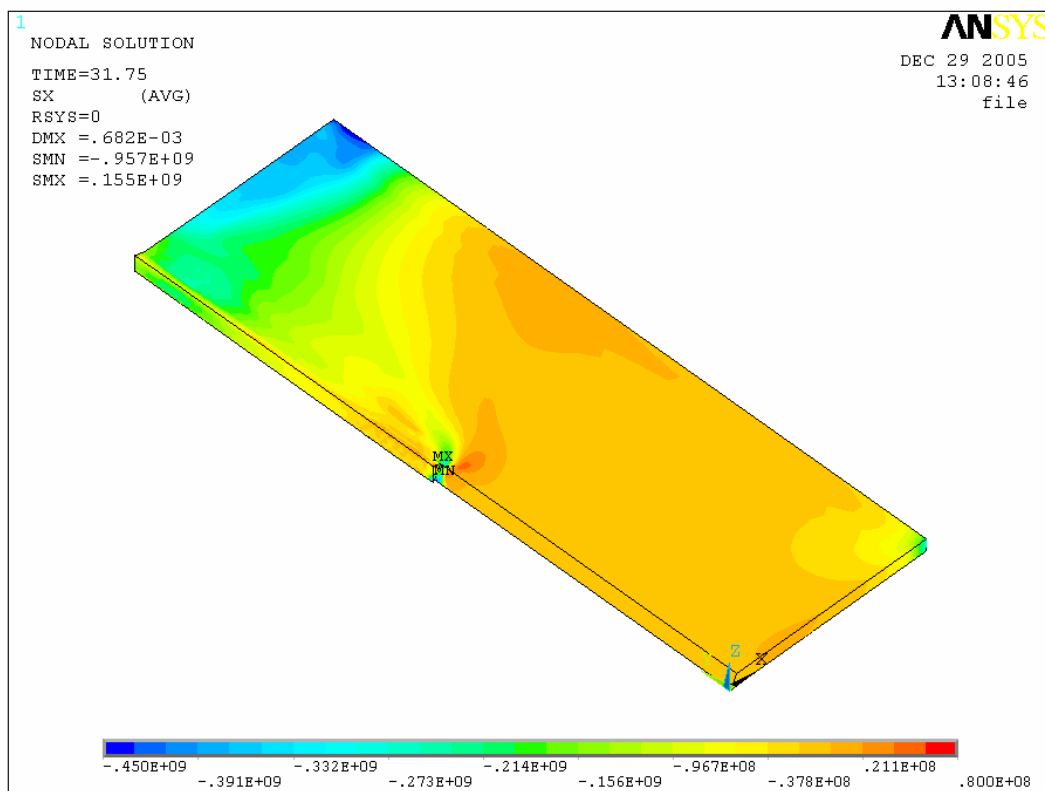


Abb. 7.21 Spannungsverteilung in x-Richtung, Zeit 31,75 sec, Ampl. $\pm 0,03$ mm, Freq. 1,0 Hz

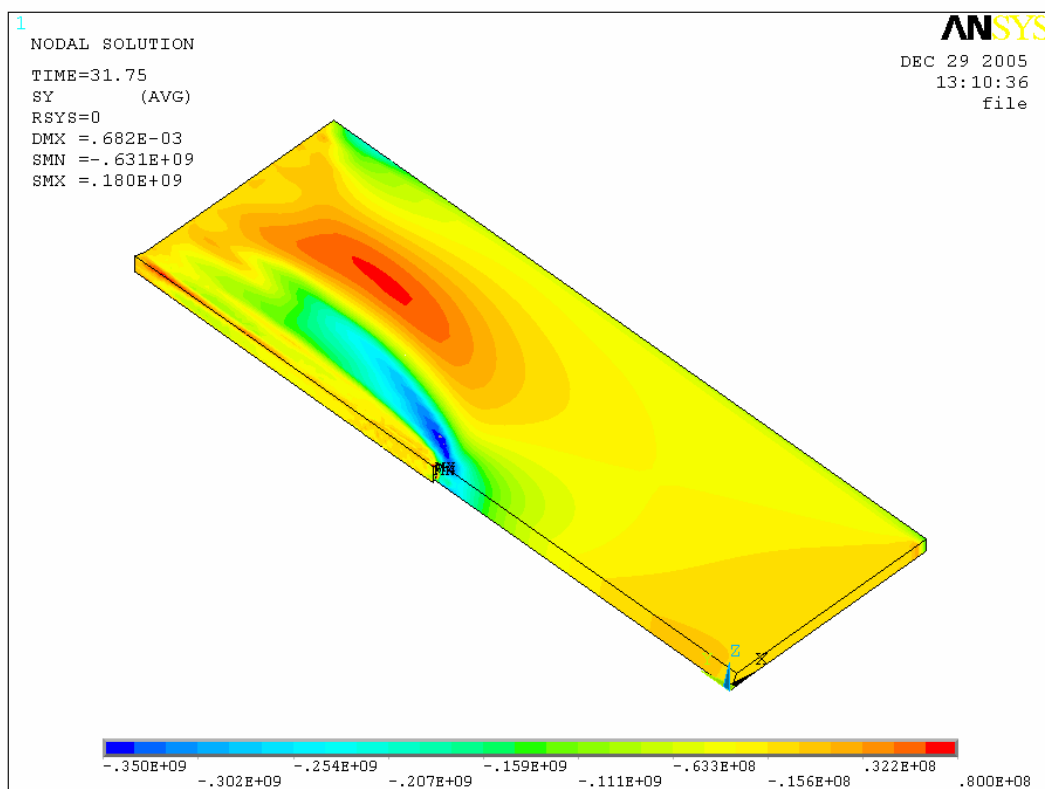


Abb. 7.22 Spannungsverteilung in y-Richtung, Zeit 31,75 sec, Ampl. $\pm 0,03$ mm, Freq. 1,0 Hz

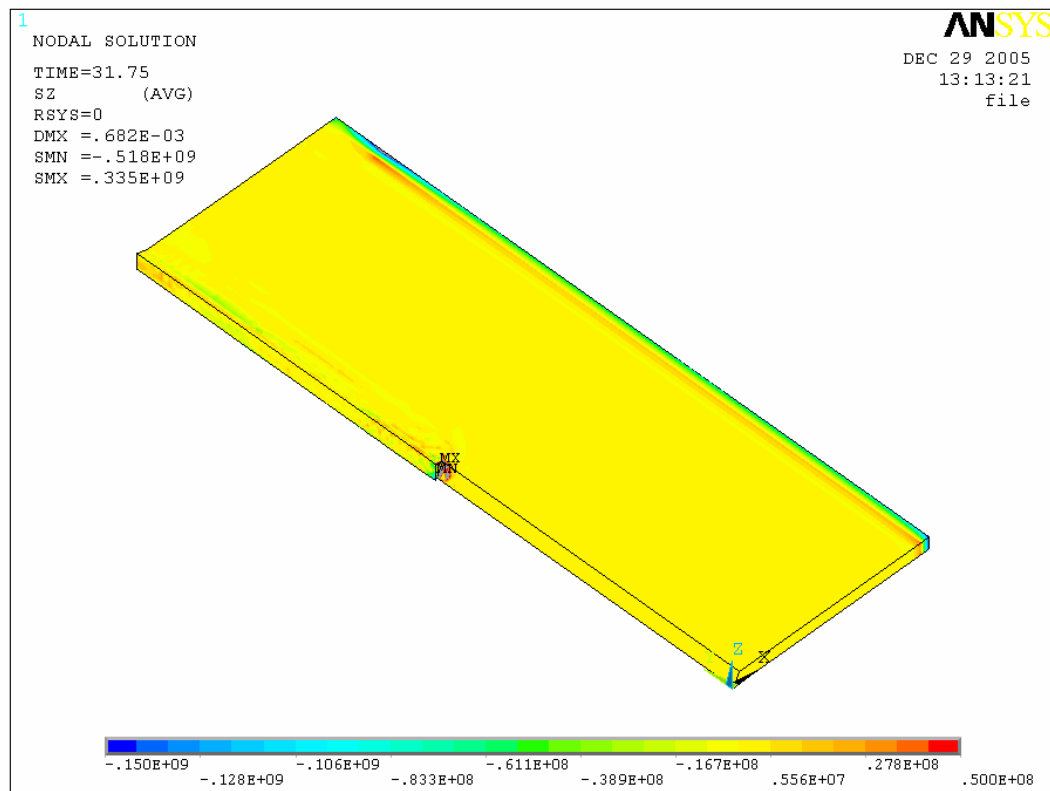


Abb. 7.23 Spannungsverteilung in z-Richtung, Zeit 31,75 sec, Ampl. $\pm 0,03$ mm, Freq. 1,0 Hz

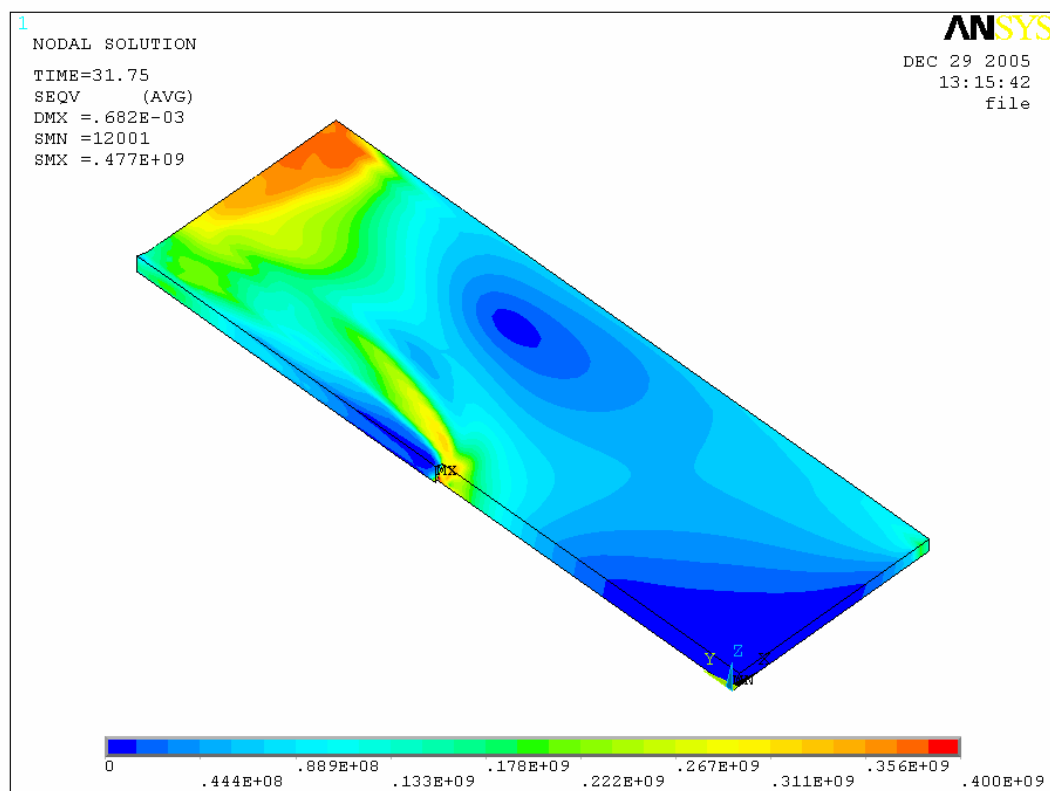


Abb. 7.24 Spannungsverteilung nach von Mises, Zeit 31,75 sec, Ampl. $\pm 0,03$ mm, Freq. 1,0 Hz

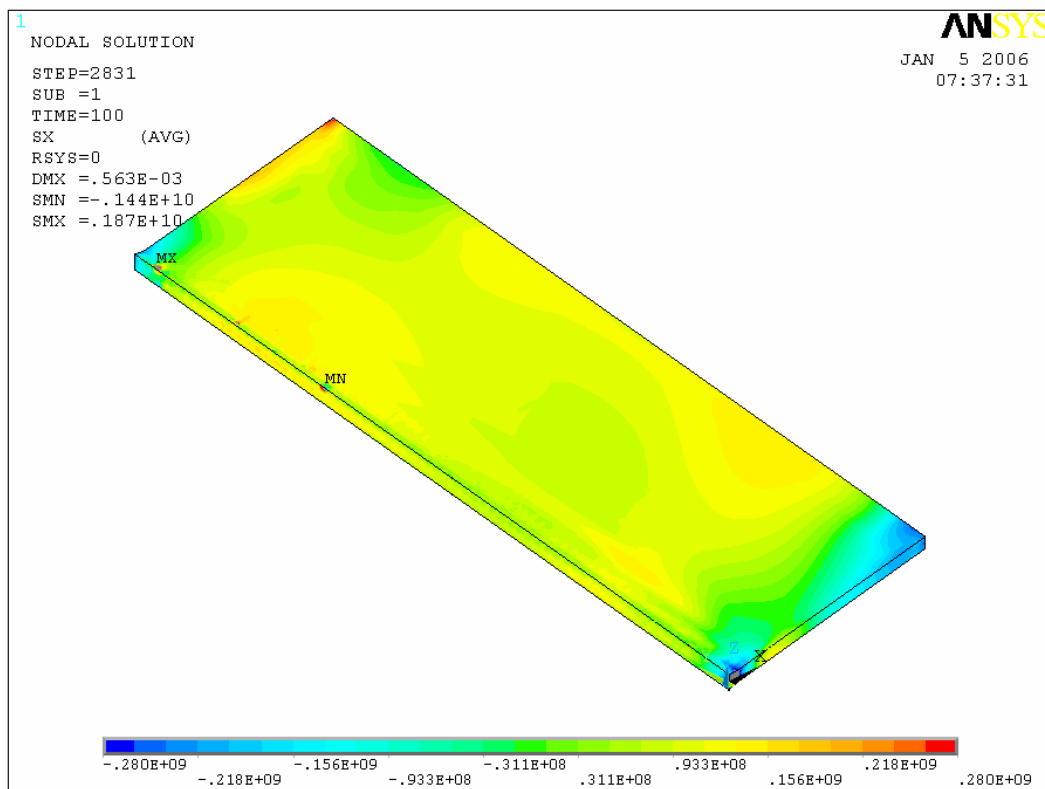


Abb. 7.25 Spannungsverteilung in x-Richtung, Zeit 100 sec, Ampl. $\pm 0,03$ mm, Freq. 1,0 Hz

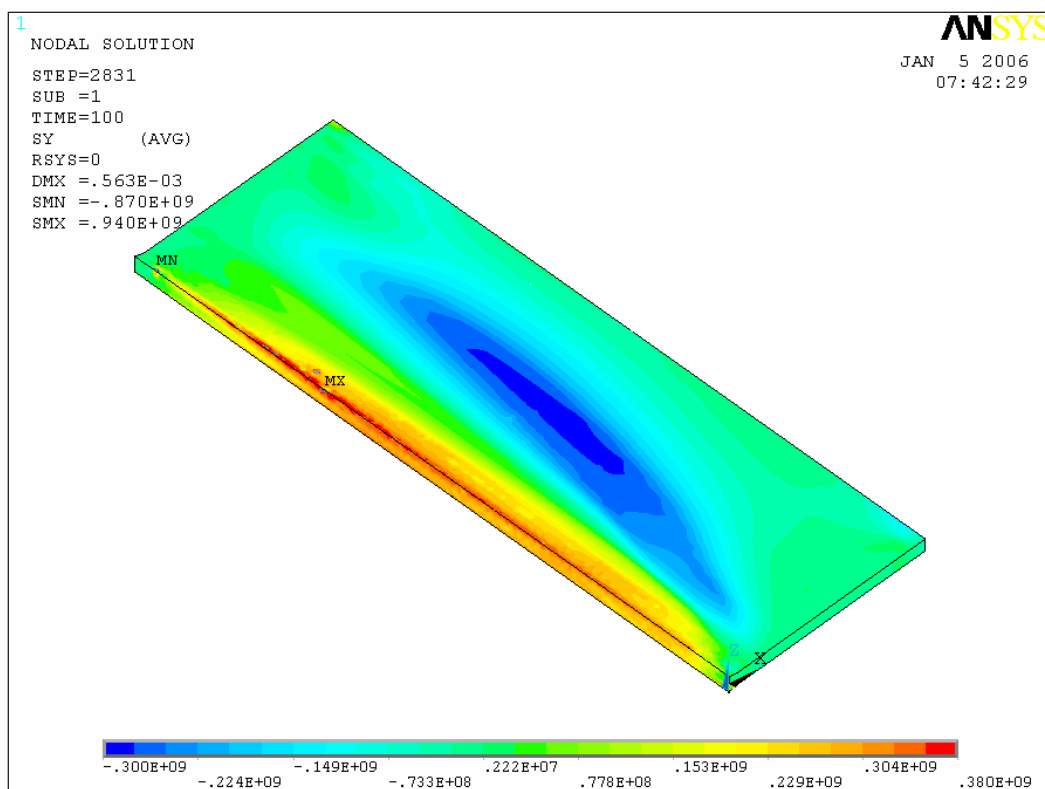


Abb. 7.26 Spannungsverteilung in y-Richtung, Zeit 100 sec, Ampl. $\pm 0,03$ mm, Freq. 1,0 Hz

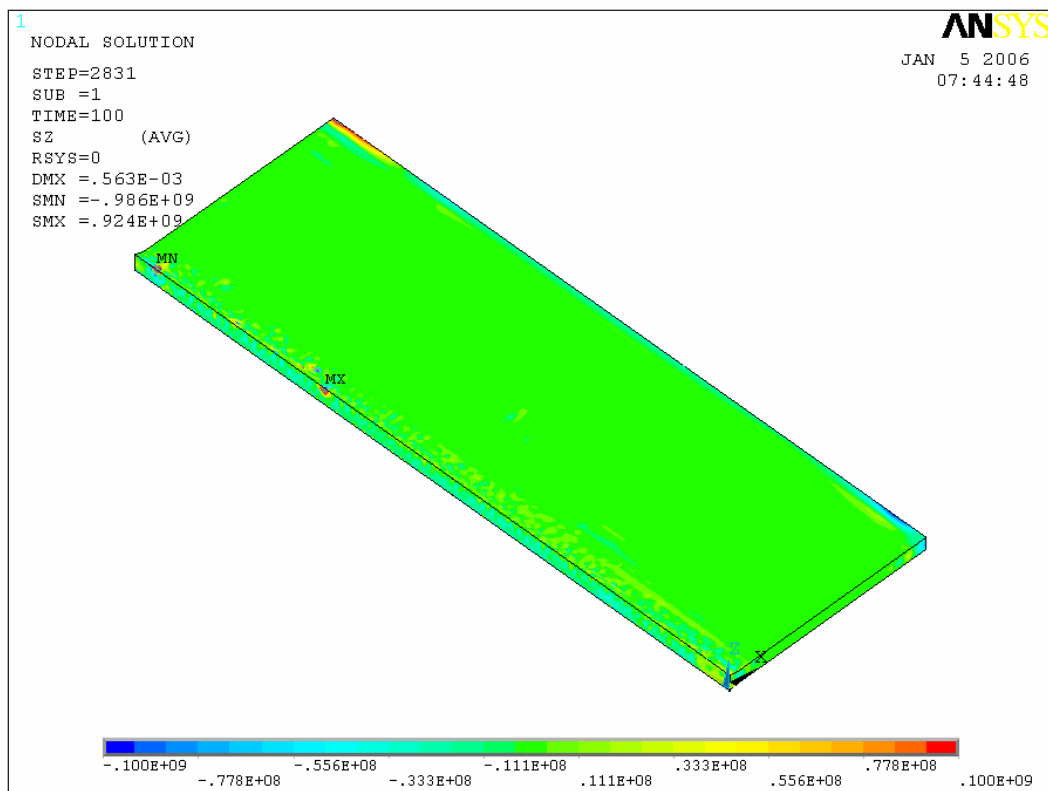


Abb. 7.27 Spannungsverteilung in z-Richtung, Zeit 100 sec, Ampl. $\pm 0,03$ mm, Freq. 1,0 Hz

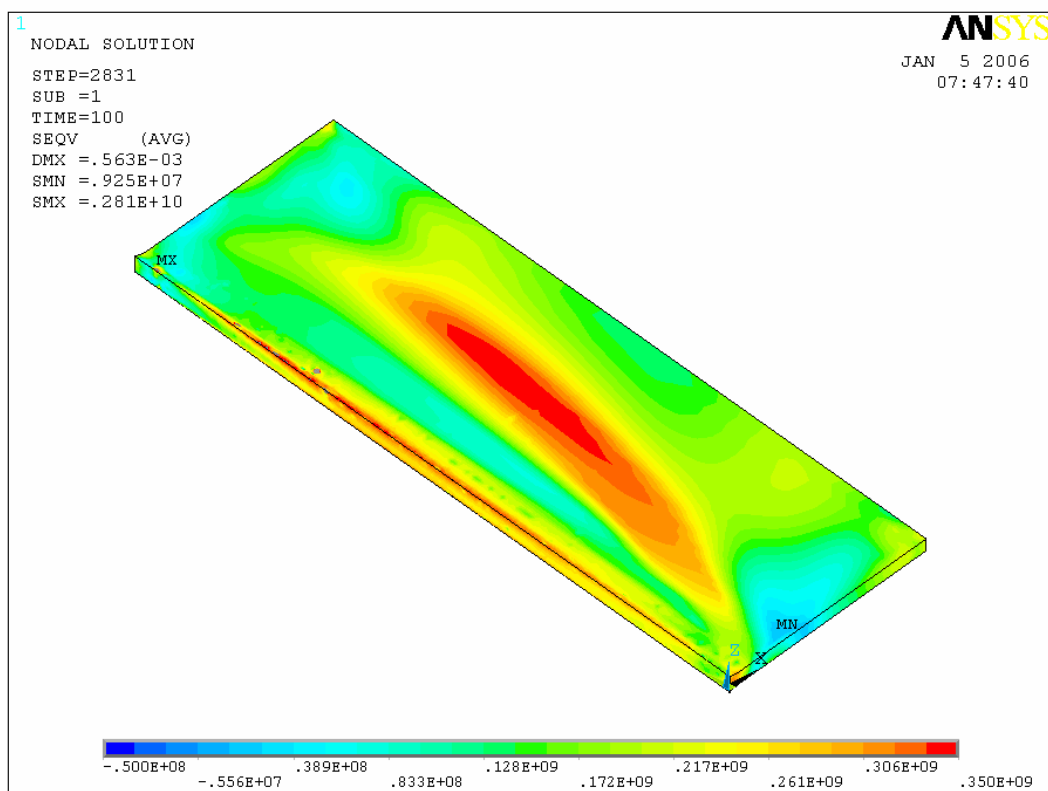


Abb. 7.28 Spannungsverteilung nach von Mises, Zeit 100 sec, Ampl. $\pm 0,03$ mm, Freq. 1,0 Hz

7.4 Schlussfolgerungen

Wie die vorstehenden Ausführungen gezeigt haben, ist die numerische Simulation der thermischen und strukturmechanischen Vorgänge einer Schweißung unter Bewegung grundsätzlich möglich. Das numerisch bestimmte transiente Temperaturfeld entspricht weitgehend der experimentellen Messung. Abweichungen sind auf Schätzungen hinsichtlich der Art und Größe des Energieeintrages, der thermischen Randbedingungen und der mangelnden Kenntnis des Wirkungsgrades zurückzuführen. Die sich aus den numerischen Analysen darstellenden Spannungsverteilungen zeigen ein plausibles Verhalten und decken sich qualitativ mit den Angaben der Literatur (siehe z.B. HAMA [1996], SCHI [1998], SCHUL [2003]). Eine experimentelle Verifizierung der Spannungsergebnisse ist nur bedingt möglich, da Mittel zur flächigen Eigenspannungsermittlung nicht zur Verfügung standen. Es muss jedoch angemerkt werden, dass die sich darstellenden Ergebnisse eine vermutlich realistischere Einschätzung geben als die derzeit zu dieser Problematik veröffentlichten Untersuchungen. Dies zeigt sich insbesondere bei der Betrachtung der Größe der im Bauteil vorherrschenden Spannungen. Überschreitungen der Streckgrenze sind nur punktuell vorhanden, numerische Spannungsangaben über die Zugfestigkeit hinaus treten nur im Bereich schärfster Kerben auf und beschränken sich auf Flächenanteile in Größe eines FE-Elementes. Hier zeigt sich somit im Besonderen der Vorteil einer ausreichend genauen Werkstoffmodellierung.

Es ist abschließend anzumerken, dass ein quantitativer Vergleich der numerischen Ergebnisse mit den Ergebnissen der Schweißversuche als nicht zweckmäßig erscheint. Dies gilt insbesondere hinsichtlich der Größe von Lagerkräften und Spannungen, da die numerische Simulation die Rissenstehung und Entwicklung sowie das teilweise Verschweißen von Rissen nicht berücksichtigt. Ein Vergleich der Ergebnisse kann und sollte somit rein qualitativ erfolgen, weshalb auf eine Gegenüberstellung von Lagerkräften verzichtet wird. Die numerische Anpassung der Simulation sowie Modifikation der zur Verfügung stehenden Elemente ist Ziel weiterer Forschung.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit ist die Charakterisierung von Schweißnähten, die unter einer definierten einachsigen Nahtflankenbewegung während des Schweißprozesses hergestellt worden sind. Das im Rahmen der durchgeführten Schweißversuche verwendete MAG-Schweißverfahren wurde mit Blick auf die in der Praxis eingesetzten Schweißverfahren ausgewählt. Die Einflüsse und Auswirkungen auf das statische Tragverhalten der unter Betriebsbeanspruchung hergestellten Schweißverbindungen wurde untersucht und bewertet.

In dem ersten Projektabschnitt erfolgte die Planung und Errichtung eines Versuchstandes zur experimentellen Erzeugung von Nahtflankenbewegungen während des Schweißprozesses. Die Anforderungen an den Prüfaufbau sahen im Wesentlichen eine vollautomatisierte Versuchsdurchführung sowie die Einhaltung kleinstmöglicher Toleranzen hinsichtlich der mechanischen Probenführung vor. Beide Anforderungen dienen der Sicherstellung einer ausreichenden Versuchsqualität, welche unbeeinflusst von menschlichen Störgrößen (Tagesform des Schweißers) ist und eine größtmögliche Reproduzierbarkeit der Versuchsdurchführung gewährleistet.

Der zweite Projektabschnitt umfasste die Durchführung von Schweißversuchen an 6 und 10 mm starken Blechproben aus S355J2G3, die unter einer einachsigen Beanspruchung, in Wegregelung, senkrecht zur Schweißnahtrichtung verschweißt wurden. Die Versuche zeigen, dass ein Verschweißen von Blechen bei anfänglicher Probentrennung sowie beim Vorhandensein einer Eigenbadsicherung grundsätzlich möglich ist. Das Parameterfeld der Untersuchung umfasste Bewegungsamplituden von $\pm 0,1$ bis $\pm 1,1$ mm sowie Bewegungsfrequenzen von 0,25 bis 7,0 Hz. Aus den Ergebnissen der Schweißversuche lässt sich eine starke Abhängigkeit der Schweißnahtgüte von der Größe der aufgetragenen Bewegungsamplitude sowie der vorherrschenden Frequenz erkennen. Sämtliche Schweißproben mit anfänglicher, vollständiger Probentrennung, wiesen bereits bei kleinsten Bewegungsamplituden Risse in der Schweißnahtmitte auf, welche in Abhängigkeit der Frequenz intermittierend über die Nahtlänge angeordnet waren. Ausgangspunkt der Rissbildung ist die Schweißnahtwurzel. Des Weiteren besteht eine Korrelation zwischen der Rissbreite und der aufgetragenen Bewegungsamplitude sowie der im Schweißversuch maximal auftretenden Kräfte. Mit steigender Größe der Bewegungsamplitude kommt es zu einer kontinuierlichen Kräftezunahme im Schweißversuch, welche in einem Maximum gipfelt, um bei weiterer Amplitudensteigerung sprunghaft abzufallen. Ebenso wie die Amplitude führt eine Erhöhung der Bewegungsfrequenz zur Abnahme der Schweißnahtgüte. Aus den Ergebnissen der durchge-

fürten Versuche ist erkennbar, dass eine Frequenzerhöhung zu einem Zusammenwachsen der Nahtmittenrisse führt, so dass ab einer Grenzfrequenz von 7,0 Hz eine tragfähige Schweißverbindung nicht mehr hergestellt werden konnte. Analog zu den Untersuchungen mit anfänglicher Probentrennung stellen sich die Ergebnisse der Schweißversuche mit Eigenbadsicherung dar. Es konnte festgestellt werden, dass die Auswirkungen der Nahtschädigung erst bei größeren Amplituden einsetzen, so dass das Vorhandensein einer Badsicherung als günstig zu erachten ist. Dies liegt darin begründet, dass der im Wurzelbereich entstehende Riss keinen sofortigen Zugang zur Umgebungsatmosphäre findet. Infolge der fehlenden Verbindung der Risse zur Oberfläche, bleibt eine Oxidation der Rissflanken bis zu einer frequenzabhängigen Grenzamplitude aus was ein teilweises Verschweißen der Rissflanken in der Druckbeanspruchungsphase erlaubt.

Aufbauend auf den Schweißversuchen erfolgte im dritten Projektabschnitt die Beurteilung der Tragfähigkeit der erstellten Schweißverbindungen. Aus den Schweißproben entnommene Zugproben wurden auf ihre statische Tragfähigkeit im Zugversuch untersucht. Das Ergebnis der Zugversuche zeigt im Wesentlichen zwei Effekte auf. Zum einen bewirkt eine Erhöhung der Bewegungsamplitude bzw. Frequenz einen Rückgang der Zugfestigkeit der Schweißverbindung. Dieser Sachverhalt lässt sich bereits aus der Bewertung der Schweißversuchsdaten ableiten. Zum anderen führt bereits eine Bewegungsamplitude von $\pm 0,2$ mm zu einem dramatischen Rückgang der Bruchdehnung auf Werte von 6-8%. Das heißt, dass eine, während der Schweißung vorhandene Bewegungsamplitude, zu einem signifikanten Duktilitätsverlust der Schweißverbindung führt. Das Bruchverhalten einer unter Betriebsbeanspruchung erstellten Schweißnaht ist somit als spröde einzustufen. Eine Verwendung derartiger Schweißnähte im Bereich hochdynamisch beanspruchter Bauwerke ist daher ausgeschlossen. Wird hingegen von einer unter Betriebsbeanspruchung hergestellten Schweißverbindung eine nur zeitlich begrenzte dynamische Standfestigkeit gefordert, so scheint eine Anwendung durchaus möglich. Die statische Festigkeit der Schweißnahtverbindung fällt im Gegensatz zur Duktilität erst mit größer werdender Frequenz und Bewegungsamplitude sprunghaft ab. Durch die Auswertung der Zugversuche ist belegt, dass die unter Betriebsbeanspruchung hergestellten Schweißnähte, bis zu einer Frequenz von 1 Hz und Amplituden bis zu $\pm 0,4$ mm, noch 60% der Tragfähigkeit einer in Ruhe geschweißten Verbindung erreichen kann. Somit ist der Einsatz einer Schweißung unter dynamischer Beanspruchung dann sinnvoll, wenn zwei Bauteile zueinander fixiert werden müssen, so dass die Schweißnähte zur eigentlichen Lastübertragung quasi in Ruhe abgeschweißt werden können.

Die metallurgischen Untersuchungen des vierten Projektabschnittes bestätigen die Ergebnisse der Schweiß- und Zugversuche. Eine genauere Untersuchung der unter Nahtflankenbewegung hergestellten Schweißproben und der aus den Zugversuchen resultierenden Bruchflächen zeigt, dass es sich bei den Rissen in der Schweißnahtmitte um Heißrisse handelt. Der Vergleich der Versuchsproben mit den in Ruhe hergestellten Schweißproben belegt, dass für die Rissentstehung die einwirkende Beanspruchung aus der Nahtflankenbewegung verantwortlich ist. Begünstigt wird die Heißrissempfind-

lichkeit durch auf den Korngrenzen auftretende Flüssigkeitsfilme aus niedrigschmelzenden Verbindungen. Die Gefügeausbildung der untersuchten Schweißverbindungen weist keine zusätzlichen Besonderheiten gegenüber den in Ruhe geschweißten Proben auf.

Für die numerische Simulation des Schweißprozesses ist es von entscheidender Wichtigkeit, das Werkstoffverhalten ausreichend korrekt abzubilden. Aufgrund des Fehlens bzw. in Ermangelung von Werkstoffkennwerten für einen Baustahl S355J2G3 bis in den Hochtemperaturbereich, wurden in einem fünften Projektabschnitt alle notwendigen, temperaturabhängigen Kennwerte bis zu einer Temperatur von 1200 °C bestimmt. Insbesondere das temperaturabhängige Spannungs-Dehnung-Verhalten des verwendeten Werkstoffes wurde eingehend untersucht, so dass die ermittelten Daten in die numerische Simulation des sechsten Projektabschnittes eingebaut werden konnten.

Die numerische Simulation des Schweißprozesses gliedert sich in die zwei Abschnitte der thermischen und strukturellen Analyse. Zur realistischen Bestimmung bzw. Abschätzung des transienten Temperaturfeldes im virtuellen Bauteil ist neben der Kenntnis der thermophysikalischen Materialkennwerte, eine ausreichende Beschreibung des Wärmeintrags durch den Schweißprozess erforderlich. Basierend auf den Gleichungen der *Goldakschen Volumenwärmequelle* erfolgte die numerische Simulation des Wärmeeintrags durch den MAG-Schweißlichtbogen ins Probenblech. Das Ergebnis der transienten Wärmefeldberechnungen wurde durch Temperaturmessungen am Probenblech im Zuge der Schweißversuche verifiziert. Es ist hervorzuheben, dass die sich aus der Rechnung und Messung darstellenden Temperaturverläufe nahezu identische Verläufe aufweisen, so dass die Qualität der Simulation als sehr gut zu bezeichnen ist. Aufbauend auf den Ergebnissen der thermischen Analyse erfolgte die numerische Simulation der strukturellen Bauteilbeanspruchung. Die sich darstellenden Spannungsverläufe im virtuellen Bauteil zeigen deutlich die Auswirkungen des Schweißprozesses. Aufgrund der verwendeten temperaturabhängigen Werkstoffkennwerte weist das numerische Ergebnis eine realistische Einschätzung der transienten Spannungsverteilung auf, welche im Einklang mit den Messdaten der Schweißversuche steht. Spannungsüberschreitungen jenseits der Zugfestigkeit treten nicht auf. Damit hebt sich das numerische Modell von den bisherigen Simulationen der Literatur ab, vgl. z. B. SCHIEBEL [1998].

Die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen bilden das Fundament für weiterführende Betrachtungen. Eine vollständige statistische Absicherung der Schweißversuche, hinsichtlich Anzahl und Material, ist nicht gegeben, so dass hier weiterer Forschungsbedarf besteht. Diese Forderung gilt auch mit Blick auf die Beanspruchungsrichtung der unter Bewegung hergestellten Schweißnaht. Die unter realen Bedingungen am Bauwerk auftretenden Bewegungsabläufe führen mitunter zu einer Beanspruchung der Schweißnaht in allen drei Raumachsen. Inwieweit sich z.B. eine reine Schubbeanspruchung längs zu Schweißnaht oder die Kombination aus Längs- und Querbeanspruchung, auf die Schweißnahtgüte auswirkt, sollte daher das Ziel weiterführender Forschung sein.

Die während des Schweißprozesses auftretende Rissbildung in der Schweißnahtmitte liegt ursächlich in der aufgebrachten Beanspruchung des Probekörpers. Es stellt sich daher die Frage, ob ein Auftreten der Heißrissbildung, bei Beibehaltung der Beanspruchung, durch geeignete schweißmetallurgische und schweißtechnische Maßnahmen in Größe und Umfang begrenzen oder gar zu vermeiden werden kann.

Metallurgische Maßnahmen sollten darauf abzielen, rissfördernde Verunreinigungen in der Schweißschmelze abzubinden, so dass die Entstehung eines Flüssigkeitsfilms auf den Korngrenzen vermieden wird. Zusätzlich könnte durch eine Kornfeinung die Oberfläche der Korngrenzen vergrößert werden, was zu einer geringeren Verunreinigungsdichte und damit zur Abnahme der Heißrissempfindlichkeit führt.

Lässt sich die Bildung von Heißrissen in der Schweißnahtmitte mit schweißmetallurgischen Maßnahmen nicht vermeiden, so ist über ertüchtigende Maßnahmen im Anschluss der Schweißung nachzudenken. Die mit Ungängen behaftete Schweißverbindung stellt sich für eine Anwendung im konstruktiven Ingenieurbau als ungeeignet dar. Durch die vorhandenen Risse ist die Lebensdauer der Schweißverbindung unter dynamischer Beanspruchung zeitlich begrenzt. Dennoch weisen die unter Betriebsbeanspruchung hergestellten Schweißverbindungen eine beträchtliche statische Festigkeit auf. Diese Festigkeit führt zu einer zeitlich beschränkten Fixierung der zu verbindenden Bauteile, d.h. die Bewegung im Bereich der Schweißung ist eingeschränkt oder gar unterbunden. Aufbauend auf dieser Fixierung könnten ertüchtigende Maßnahmen darauf abzielen, den Rissbereich der Schweißnaht auszubessern, so dass dieser einer in Ruhe hergestellten Schweißnaht gleichzusetzen ist. Dies wäre durch ein punktuelles, erneutes Aufschmelzen der geschädigten Nahtbereiche mittels Plasmaschweißung möglich. Die erkalteten Nahtbereiche der geschädigten Schweißnaht dienen dabei der Bauteilfixierung, so dass das Schmelzbad der Plasmaschweißung quasi in Ruhe ohne äußere Beanspruchung erstarrt. Das sich im Anschluss der Maßnahme darstellende Gefüge würde somit einer mangelfreien Schweißung gleichzusetzen sein. Experimentelle und rechnerische Untersuchungen zu den genannten Überlegungen stehen noch aus und sind Ziel weiterer Forschung am Institut für Stahlbau der TU Braunschweig.

Literatur

- ADKI [1987] Adkins, G.: Effective heat input study, phase 1, final report. Welding Research Council. Project Report 42 (1987), S. 19-22
- AHRE [1994] Ahrens, H., Dinkler, D.: Finite-Element-Methoden Teil I. Bericht Nr. 88-50, Braunschweig: Institut für Stahlbau 1994
- AHRE [1996] Ahrens, H., Dinkler, D.: Finite-Element-Methoden Teil II. Bericht Nr. 88-51, Braunschweig: Institut für Stahlbau 1996
- AL-AR [1976] Al-Arabi, M., El-Riedy, M. K.: Natural convection heat transfer from isothermal horizontal plates of different shapes. Int. Journal Heat Mass Transfer 19 (1976), S. 1049-1053
- ARGY [1985] Argyris, J. H., Szimat, J., William, K. J.: Finite Element Analysis of Arc Welding Processes. Numerical Methods in Heat Transfer (1985), S. 31-34
- BAEHR [1998] Baehr, H. D., Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung. Berlin: Springer Verlag 1998
- BARG [2000] Bargel, H.-J., Schulze, G.: Werkstoffkunde. Berlin: Springer Verlag 2000
- BATHE [2002] Bathe, K.-J.: Finite-Element-Methoden. Berlin: Springer Verlag 2002
- BOESE [1995] Boese, U.: Das Verhalten der Stähle beim Schweißen – Teil I: Grundlagen. Düsseldorf: DVS-Verlag 1995
- BOESE [2001] Boese, U., Ippendorf, F.: Das Verhalten der Stähle beim Schweißen – Teil II: Anwendung. Düsseldorf: DVS-Verlag 2001
- BÖCKH [2004] Böckh, P. v.: Wärmeübertragung – Grundlagen und Praxis. Berlin: Springer Verlag 2004
- BÖHME [1984] Böhme, D., Heuser, H.: Einfluss der Schweißparameter auf die Erstarrungsrissneigung von unlegiertem Unterpulverschweißgut. Schweißen und Schneiden 36 (1984), H. 3, S. 109-112
- BÖHME [1987] Böhme, D., Heuser, H.: Möglichkeiten der Einflussnahme auf die Heißrissneigung beim Unterpulverschweißen von Schiffbaustählen. Schweißen und Schneiden 39 (1987), H. 11, S. 543-548
- BÖTT [2002] Böttcher, C.: Geschwindigkeitssensitivität des mechanischen Verhaltens unlegierter Baustähle bei wiederholter Beanspruchung bis in den inelastischen Bereich – experimentelle Untersuchung und Modellierung. VDI-Berichte, Reihe 5, Nr. 654, Düsseldorf: VDI-Verlag 2002
- BORL [1960] Borland, J. C.: Generalized theory of super-solidus cracking in welds. British Welding Journal 7, (1960) H. 8, S. 508-512
- BORL [1961] Borland, J. C.: Suggest explanation of hot cracking in mild and low alloy steel welds. British Welding Journal 8, (1961) H. 11, S. 526-540

- BUNG [1965] Bungardt, K., Spyra, W.: Wärmeleitfähigkeit unlegierter und legierter Stähle und Legierungen bei Temperaturen zwischen 20 und 700 °C. Arc. Für Eisenhüttenwesen. 36. Jahrgang, Heft 4, 1965
- DVS [1997] Handbuch der Kennwerte von metallischen Werkstoffen nach EN zur FE-ZEN-Werkstoff-Datenbank. Düsseldorf: DVS-Verlag 1997
- DING [2000] Ding, H., Zhu, S., Fu, H.: Scanning electron micro-analysis for hot cracks in directionally solidified alloys. Journal of China Textile University, English Edition (2000) H. 3, S47 - 49
- EICH [1972] Eichborn, F., Niederhoff, K.: Streckenenergie als Kenngröße des Wärmeinbringens beim mechanisierten Lichtbogenschweißen. Schweißen und Schneiden 43 (1972), H. 10, S.399-403
- FÖLL [2004] Föll, H.: Einführung in die Materialwissenschaften I. Lehrstuhl für allgemeine Materialwissenschaften, Christian-Albrechts-Universität Kiel, Eigenverlag 2004
- FÖRS [1992] Gerätebeschreibung Elasotmat 1.024, Insitut Dr. Förster, Reutlingen: Eigenverlag 1992
- GOLD [1985] Goldak, J. Patel, B., Bibby, M., Moore, J.: Computational Weld Mechanics. Advabced Joining of Aerospace Metallic Materials, Conferende Proceedings No. 398 (1985), S. 11-32
- GOTT [2001] Gottstein, G.: Physikalische Grundlagen der Metallkunde. Berlin: Springer Verlag 2001
- GROTH [2001] Groth, C., Müller, G.: FEM für Praktiker – Band 3: Temperaturfelder. Renningen-Malsheim: Expert-Verlag 2001
- HAAS [1994] Haasen, P.: Pysikalische Metallkunde. Berlin: Springer Verlag 1994
- HAKE [2002] Hakenesch, P. R.: Technische Thermodynamik. TU München, Eigenverlag 2002
- HANUS [1993] Hanus, F., Häring, H.W., Heuser, H.: Erfahrungen zum Heißrissverhalten von unlegierten Stählen des Apparatebaus. DVS-Berichte, Band 151, Düsseldorf: DVS-Verlag 1993
- HAMA [1996] Hamann, R.: Numerische Berechnung des instationären Temperaturfeldes im Schweißkörper für den nassen Plasma-MIG-Unterwasserschweißvorgang. VDI-Berichte, Reihe 2, Nr. 378, Düsseldorf: VDI-Verlag 1996
- HORN [2001] Hornbogen, E., Warlimont, H.: Metallkunde – Aufbau und Eigenschaften von Legierungen. Berlin: Springer Verlag 2001
- HÜNE [1987] Hünensen, G.: Nachweisführung für Stahltragglieder beim Schweißen unter Last. Habilitation, Leipzig 1987
- HÜNE [1992] Hünensen, G., Hänsch, H., Augustyn, J.: Zum Schweißen an belasteten Konstruktionen. Stahlbau 61 (1992), H. 11, S. 325-328
- KALWA [1993] Kalwa, C.: Zum Einfluss der statischen und dynamischen Reckalterung auf die Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften von Stählen. Berichte aus dem Institut für Eisenhüttenkunde, Band 1, Aachen: Verlag Shaker 1993
- KARL [1998] Karlsson, L.: Thermal stresses in welding. Thermal Stresses, Bd. 1. Amsterdam: North-Holland 1986, S. 299-389

- KLIN [1975] Klingauf, S.: Beitrag zum Mechanismus der schweißbedingten Heißrissigkeit eines niedriglegierten schwefelarmen Stahls. Dissertation, UNI Hannover 1975
- KLIN [1980] Klingauf, S.: Theorie zum Entstehen von Heißrissen in hocherwärmten Werkstoffbereichen. Schweißen und Schneiden 32 (1980), H. 7, S. 258-263
- KRÜM [1998] Krümming, S.: Schallemissionsanalyse zum Nachweis der Materialermüdung von Baustahl. Dissertation, TU Braunschweig 1998
- LANGE [1984] Lange, K.: Umformtechnik, Band 1: Grundlagen. Berlin: Springer Verlag 1984
- LIND [1999] Lindhorst, L.: Numerische Simulation des Plasma-MIG-Unterwasserschweißens – Eigenspannungen, Gefüge und Bruchmechanik. VDI-Berichte, Reihe 2, Nr. 499, Düsseldorf: VDI-Verlag 1999
- MAHR [1994] Mahrenholz, O., Hamann, R.: On the influence of the surface heat transfer coefficient on wet underwater welds. Proceedings of the Fourth International Off-shore and Polar Engineering Conference (1994), S. 112-119
- Mehm [2003] Mehmert, P.: Numerische Simulation des Metallschutzgaschweißens von Grobblechen aus un- und niedriglegiertem Feinkornbaustahl. Dissertation, TU Clausthal 2003
- MOORE [1985] Moore, J. E., Bibby, M., Goldak, J.: A Comparison of the Point Source and Finite Element Schemes for Computing Weld Cooling. '85 ASM's International Welding Congress (1985)
- MÜLL [2000] Müller, G., Groth, C.: FEM für Praktiker – Band 1: Grundlagen. Renningen-Malsheim: Expert-Verlag 2000
- NAKA [1985] Nakanishi, Y., Nakamura, Y., Murayama, T., Sakai, K., Kohno, T., Kamijoh, T.: Study on welding under pulsating stress in service condition. IIW Doc. IX-1352-85, (1985)
- NAKA [1987] Nakanishi, Y., Nakamura, Y., Sakai, K., Kohno, T., Satoh, K., Kawai, Y., Yamaguchi, T., Nishiyama, N.: A study on welding in service conditions - development of electrode for welding under pulsating stress. IIW Doc. xV-634-87, (1985)
- Nguy [1999] Nguyen, N. T., Ohta K., Matsuoka K., Suzuki, N., Maeda, Y.: Analytical Solutions for Transient Temperature of Semi-Infinite Body Subjected to 3-D Moving Heat Sources. Welding Journal (1999), S. 265-274
- PAPU [2001] Papula, L.: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 3. Braunschweig/Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn 2001
- PAST [1995] Pasternak, H., Engst, W., Schilling, S.: Verhalten der Bauteile beim Schweißen unter Last. Schweißen und Schneiden 47 (1995), H. 9, S. 734-738
- PEIL [2004] Peil, U., Wichers, M.: Schweißen unter Betriebsbeanspruchung - Werkstoffkennwerte für einen S355J2G3 unter Temperaturen bis 1200°C. Stahlbau 73 (2004), H. 6, S. 400-416
- PEIL [2005A] Peil, U., Wichers, M.: Schweißen unter Betriebsbeanspruchung - Werkstoffkennwerte zur Temperaturfeldberechnung für einen S355J2G3. Stahlbau 74 (2005), H. 4, S. 249-257

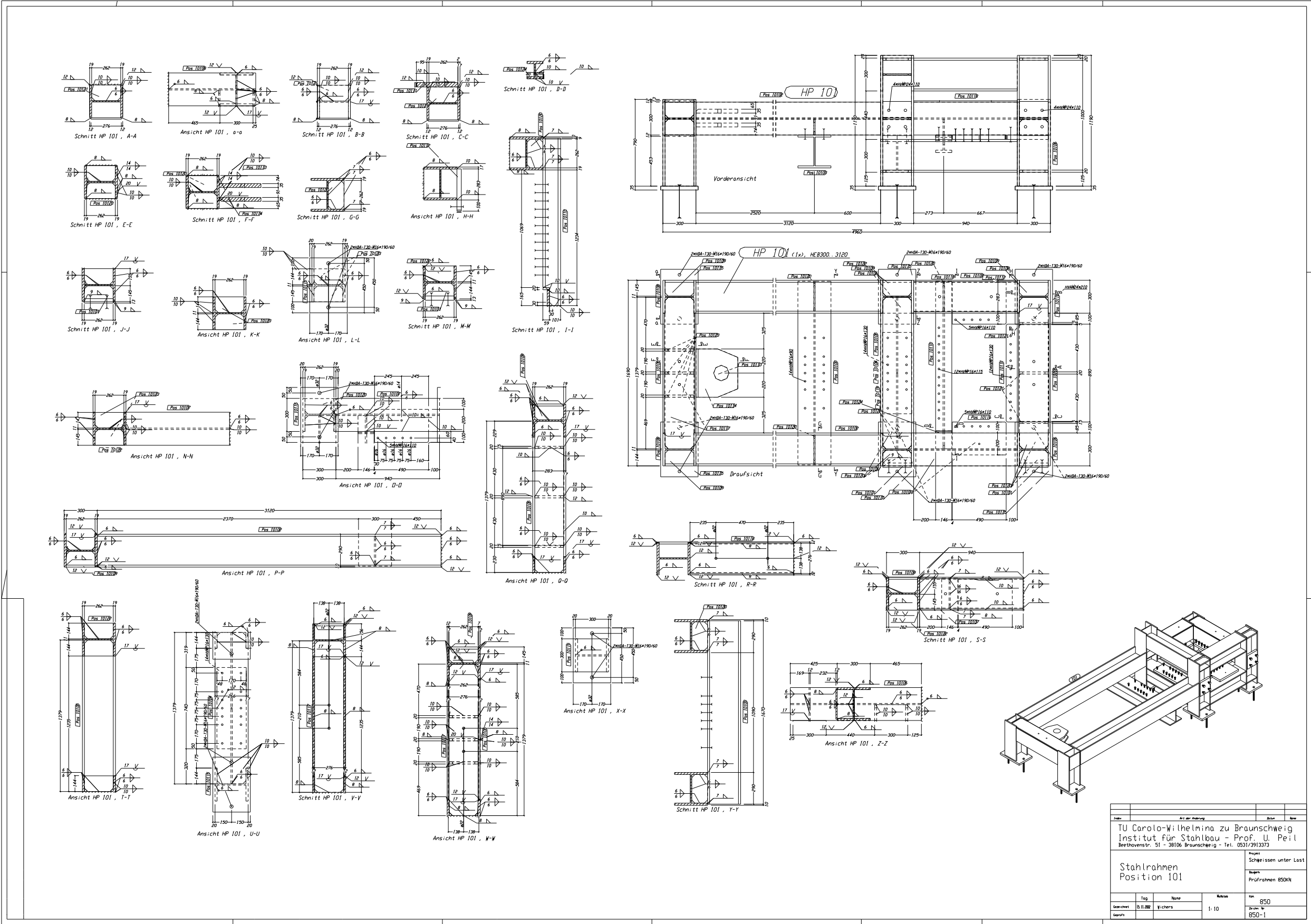
- PEIL [2005B] Peil, U., Wichers, M.: Schweißen unter Betriebsbeanspruchung - Numerische und experimentelle Bestimmung des Temperaturfeldes beim Schweißen. Stahlbau 74 (2005), H. 11, S. 843-851
- PEIL [2005C] Peil, U., Wichers, M.: Schweißen unter Betriebsbeanspruchung - Experimentelle Untersuchungen unter einachsiger Nahtflankenbewegung während des Schweißprozesses. Stahlbau 74 (2005), H. 12, S. 891-900
- PITTER [1992] Pitter, A.: Dreidimensional-instationäre Simulation von Temperaturfeldern beim WIG-Schweißen von Werkstücken mit temperaturabhängigen Materialkennwerten. Dissertation, TU Clausthal 1992
- POUL [2000] Poulikakos, D.: Thermodynamik I. Institut für Energietechnik der ETH Zürich, Eigenverlag
- POWE [1963] Powell, R. W.: Correlation of the Thermal and Electrical Conductivity of Metals, Alloys and Compounds. Proceed. Confer. On Thermal Conductivity, 3rd, 1963, 1, S. 79-112, Metals and Veramics Div., ORNL, Gatlinburg, Tenn.
- PROB [1997] Probst, R., Herold, H.: Kompendium der Schweißtechnik, Band 2: Schweißmetallurgie. Düsseldorf: DVS-Verlag 1997
- PROK [1962A] Prokhorov, N. N.: Die Plasizität der kristallisierenden Metalle. Litejnoe Proiz. (1962), H. 4, S. 32-35
- PROK [1962B] Prokhorov, N. N., Jakushin, B. F.: Theorie und Verfahren zum Bestimmen der technologischen Festigkeit von Metallen während des Kristallisationsprozesses beim Schweißen. Svar. Proiz., Moskau 35 (1962), H. 4, S. 1-5
- PROK [1962C] Prokhorov, N. N.: Die Widerstandsfähigkeit der Metalle gegen die Bildung von Rissen während der Gußkörperbildung. Litejnoe Proiz. (1962), H. 4, S. 28-31
- PROK [1965] Prokhorov, N. N.: The Technological Strength of Metals while Crystallising During Welding. IIW-Dok. IX-479-65
- PROK [1968] Prokhorov, N. N., Jakushin, B. F.: Theorie und Verfahren zum Bestimmen der technologischen Festigkeit von Metallen während des Kristallisationsprozesses beim Schweißen. Schweißtechnik 18 (1968), H. 2, S. 8-11
- RADAJ [1999] Radaj, D.: Schweißprozeßsimulation – Grundlagen und Anwendungen. Düsseldorf: DVS-Verlag 1999
- RICH [1973] Richter, F.: Die wichtigsten physikalischen Eigenschaften von 52 Eisenwerkstoffen. Stahleisen – Sonderberichte Heft 9, Düsseldorf: Verlag Stahleisen 1973
- RÖBE [1977] Röbenack, K. D., Hüther, G., Röhling, S.: Bestimmung des effektiven Wärmenutzungsfaktors beim Schmelzschweißprozess. Schweißtechnik 27 (1977), H. 12, S. 562-563
- ROSE [1941] Rosenthal, D.: Mathematical theory of heat distribution welding, cutting. Welding Research Supplement (1941), S. 220-234
- ROSE [1946] Rosenthal, D.: The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments. Trans actions of the ASME (1946), S. 849-866
- ROSI [1975] Rosinger, H. E.: Snoek Rearrangement and Long-Range Diffusion during Strain.Ageing in Iron. Met. Sic. 9 (1975)
- RYKA [1957] Rykalin, N. N.: Berechnung der Wärmeevorgänge beim Schweißen. Berlin: VEB Verlag Technik 1957

- SCHI [1998] Schiebel, C.: Schweißen unter Betriebsbeanspruchung –Eigenspannungen und bruchmechanische Betrachtung. VDI-Berichte, Reihe 18, Nr. 235, Düsseldorf: VDI-Verlag 1998
- SCHL [1997] Schlöder, E.-U., Gnielinski, V., Martin, H., et al.: VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. Berlin: Springer Verlag 1997
- SCHU [2005] Schumann, H., Oettel, H.: Metallografie. Weinheim: Wiley-VCH Verlag 2005
- SCHUL [2003] Schulze, G.: Die Metallurgie des Schweißens. Berlin: Springer Verlag 2003
- SCHUS [2004] Schuster, J.: Heißrisse in Schweißverbindungen – Entstehung, Nachweis und Vermeidung. DVS-Berichte, Band 233, Düsseldorf: DVS-Verlag 2004
- THIER [1989] Thier, H.: Heißrisse neigung unlegierter Werkstoffe unter besonderer Berücksichtigung des Sauerstoffgehaltes. DVS-Berichte, Band 117, Düsseldorf: DVS-Verlag 1989
- TREM [1995] Tremmer, D., Schreiber, S.: Beiträge zur Metallurgie des UP-Schweißens – Teil 2: Beeinflussung von Sulfidausscheidungen. Schweißen und Schneiden 47 (1995), H. 12, S. 978-985
- VALT [1995] Valtinat, G., Ansorge, J.: Schadensbehebung von atmenden Rissen an bewegten Bauteilen und Betriebsfestigkeit/Verfügbarkeit von reparierten Verbindungen von Stahlkonstruktionen im Wasser. DFG-Forschungsbericht B2/C2, TU Hamburg-Harburg 1995
- VDE [1997] Erscheinungsform von Rissen und Brüchen metallischer Werkstoffe. Düsseldorf: Verlag Stahleisen 1997
- WEIß [1994] Weiß, D.: Finite-Element-Simulation von Temperaturfeld und Schmelzbaddeformation beim Lichtbogenschweißen. Dissertation, Otto-von-Geuricke-Universität Magdeburg 1994
- WEIß [2000] Weißbach, W.: Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung. Braunschweig: Vieweg Verlag 2000
- WERK [1984] Werkstoffkunde Stahl, Band 1: Grundlagen. Berlin: Springer Verlag 1984
- WOHL [2001] Wohlfahrt, H.: Skript zur Vorlesung Fügetechnik I. Braunschweig: Eigenverlag 2001

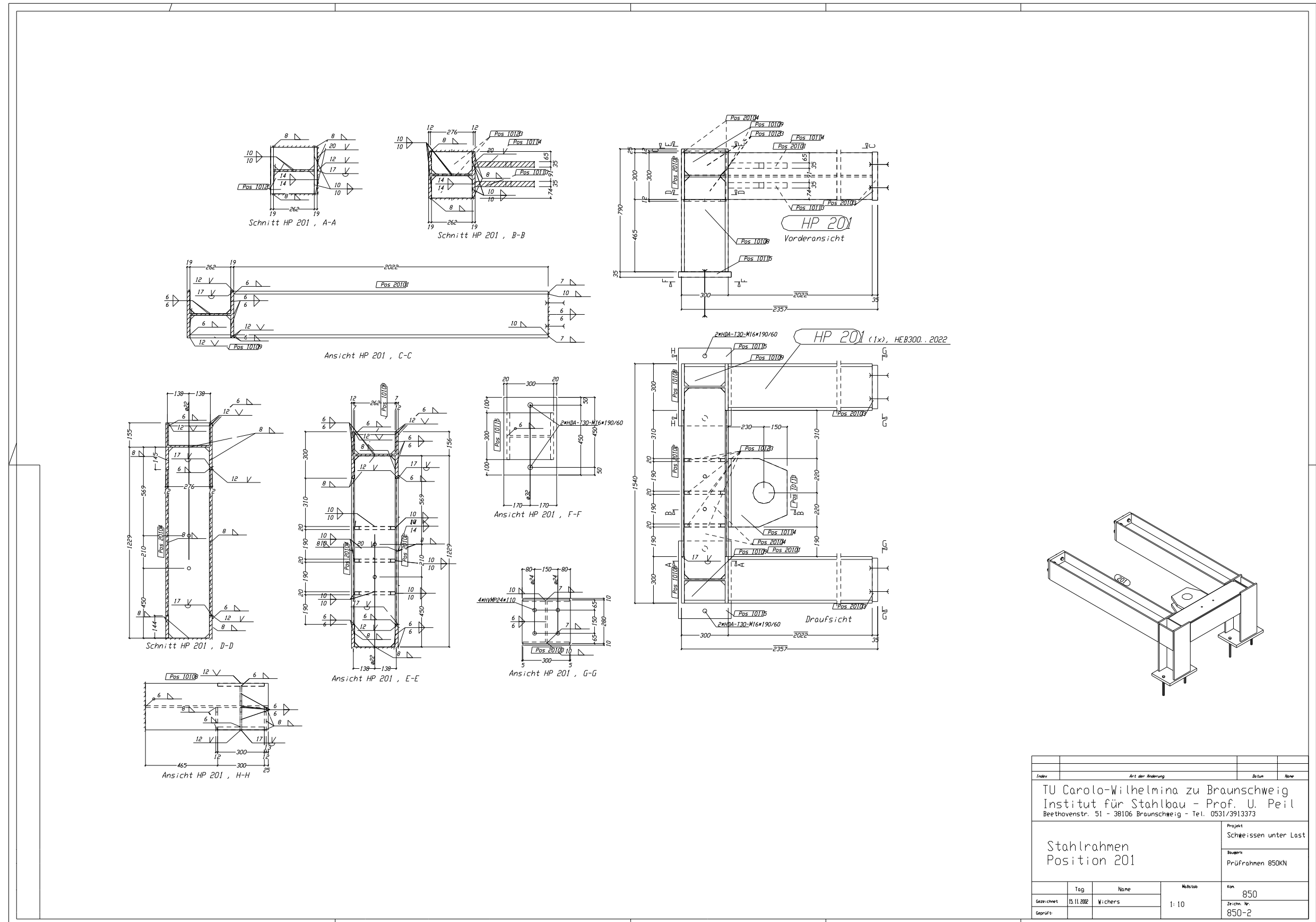
Anlagen

Alle Angaben beziehen sich auf den untersuchten Werkstoff S355J2G3.

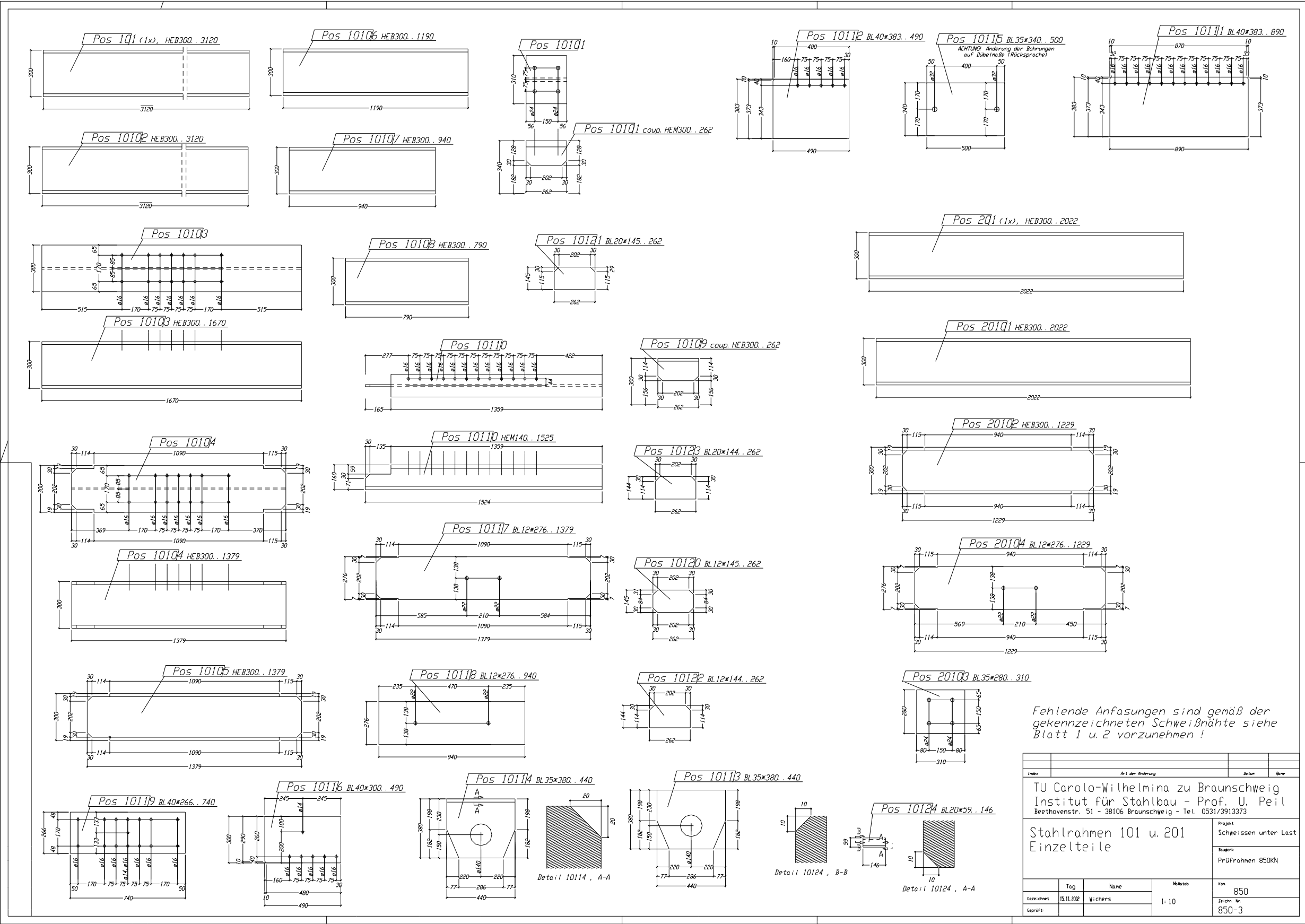
A1 Konstruktionszeichnung Hauptrahmen



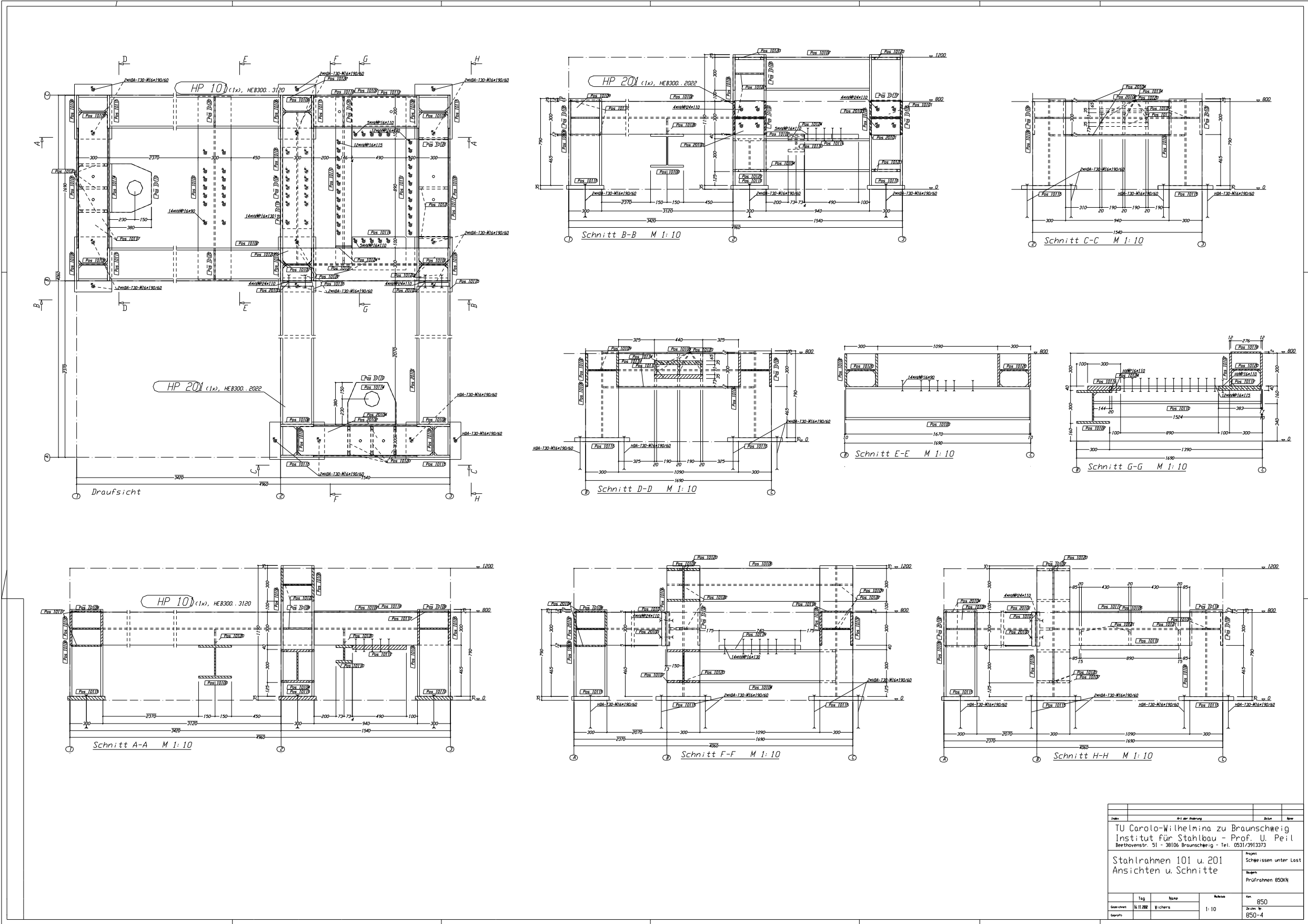
A2 Konstruktionszeichnung Nebenrahmen



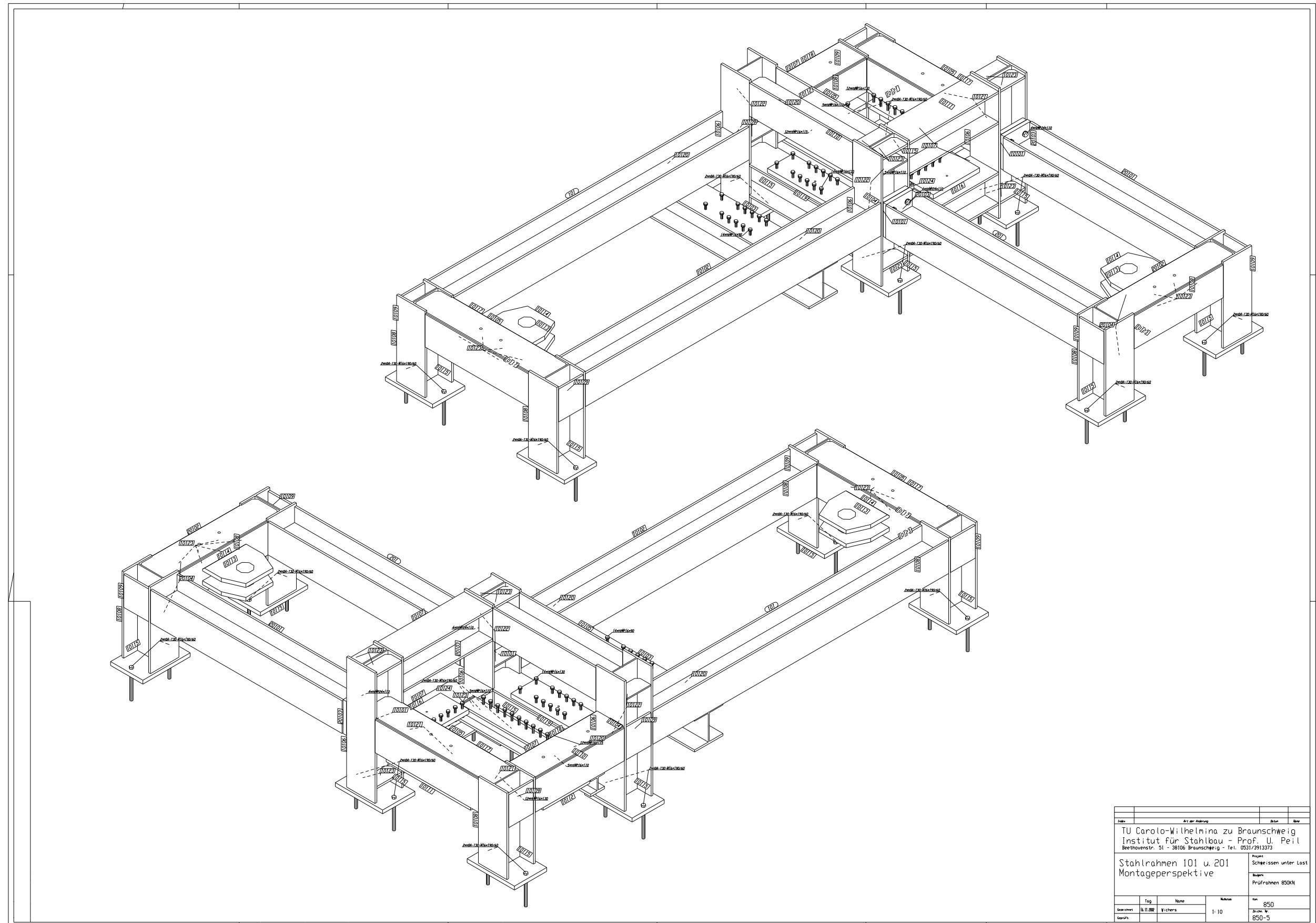
A3 Einzelteilzeichnung Haupt- und Nebenrahmen



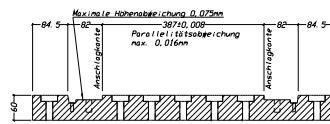
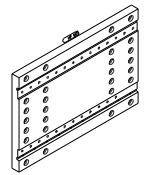
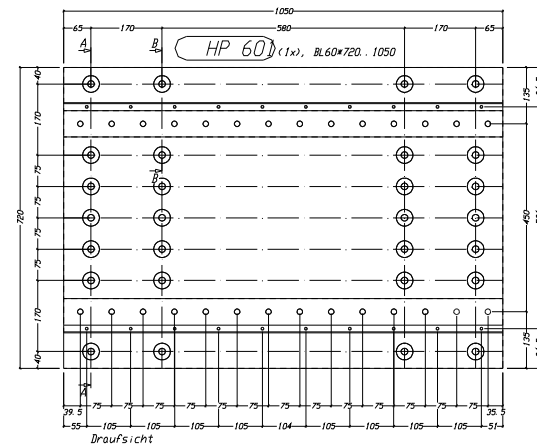
A4 Montageübersicht



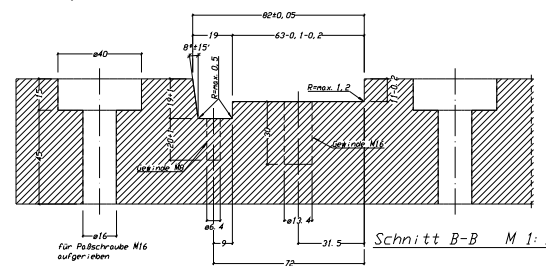
A5 Positionsplan/Perspektive Montage



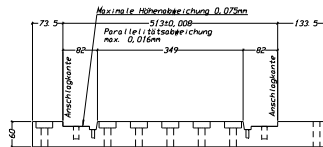
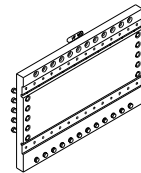
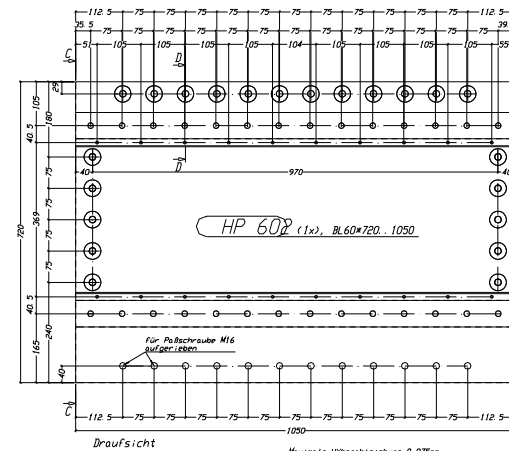
A6 Werkstattzeichnung Lagerschlitten



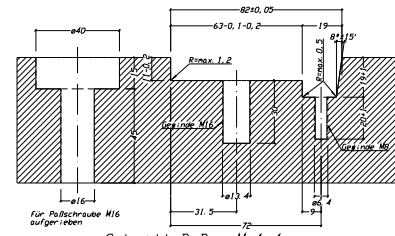
Schnitt A-A M 1:5



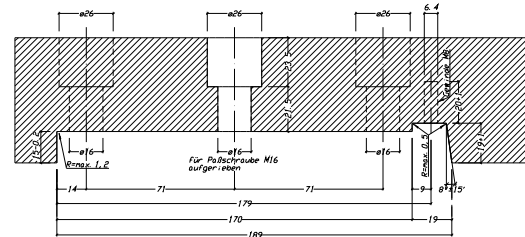
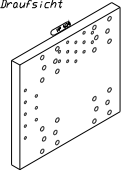
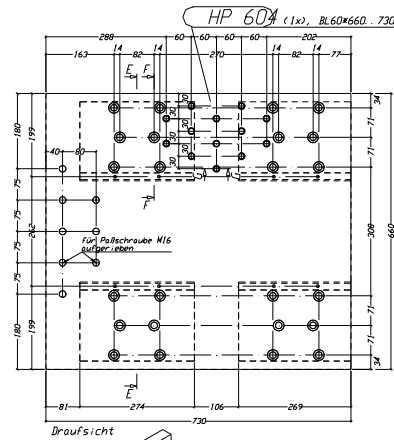
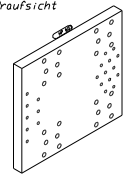
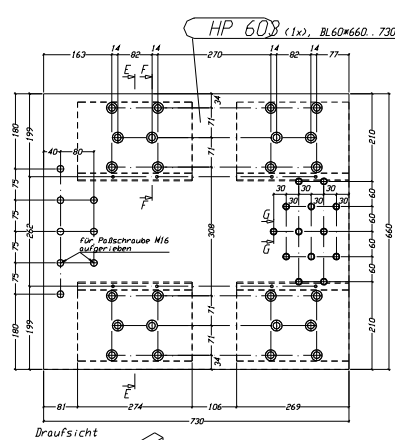
Schnitt B-B M 1:1



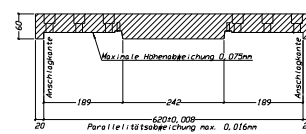
Ansicht C-C M 1:5



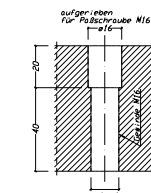
Schnitt D-D M 1:1



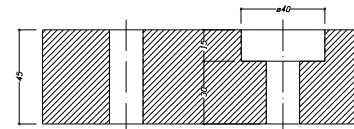
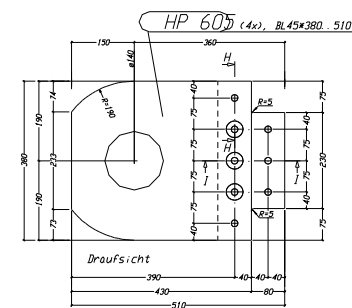
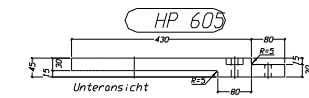
Schnitt F-F M 1:1



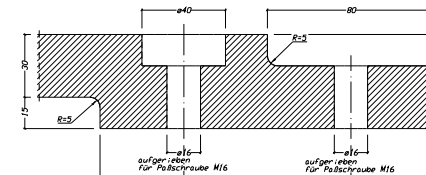
Schnitt E-E M 1:5



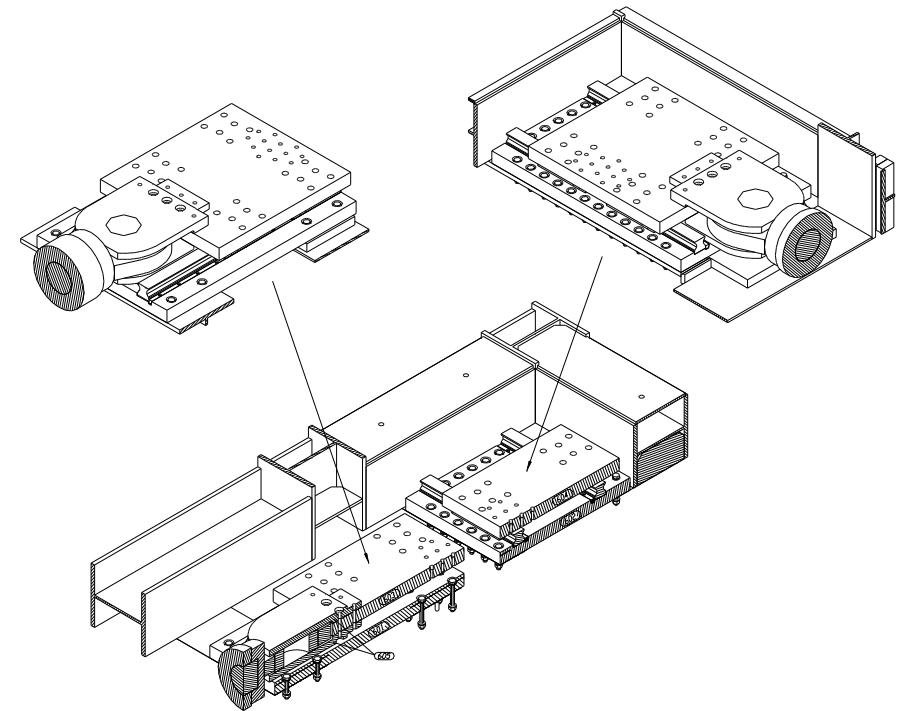
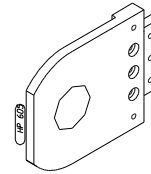
Schnitt G-G M 1:1



Schnitt H-H M 1:1

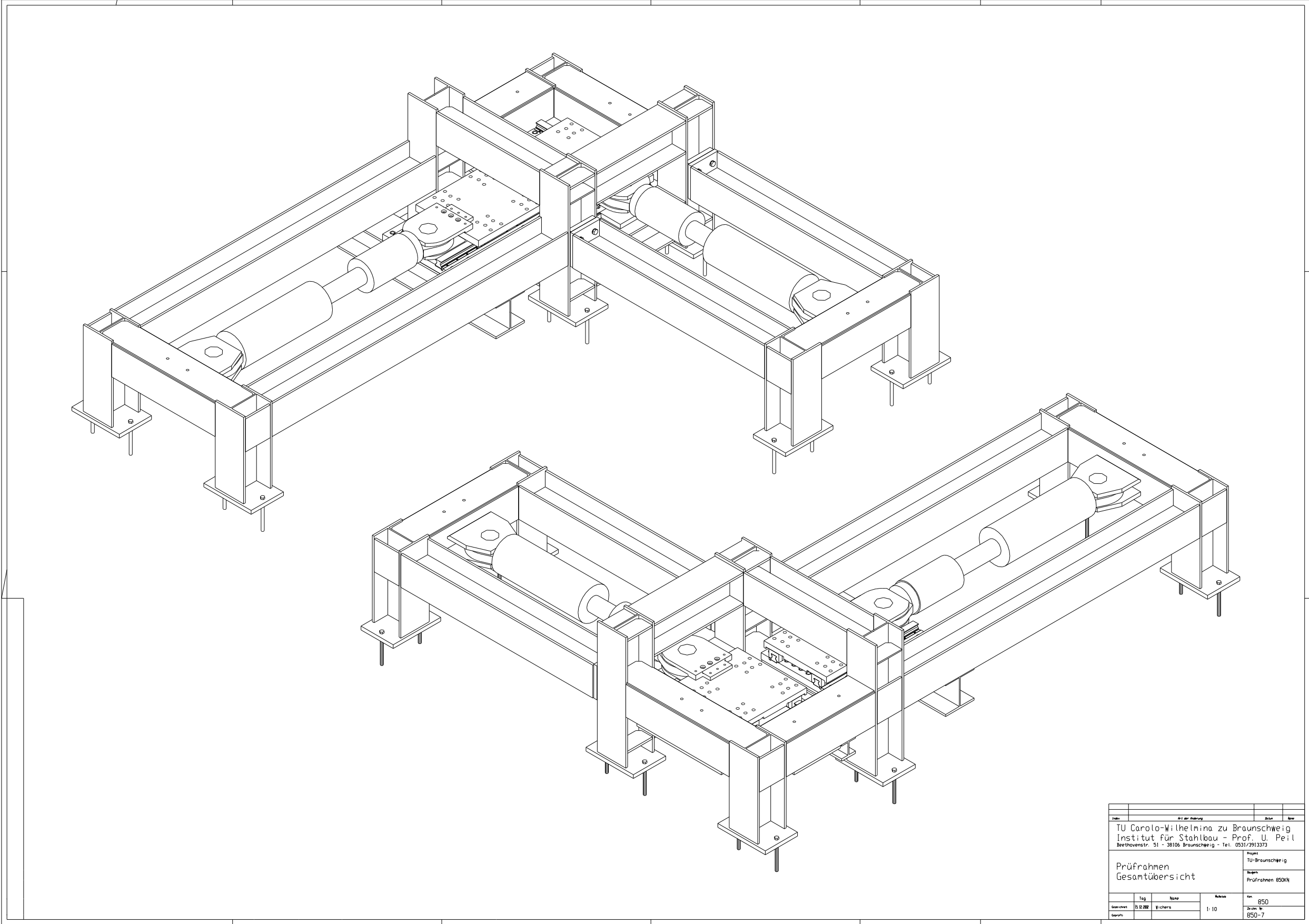


Schnitt I-I M 1:1

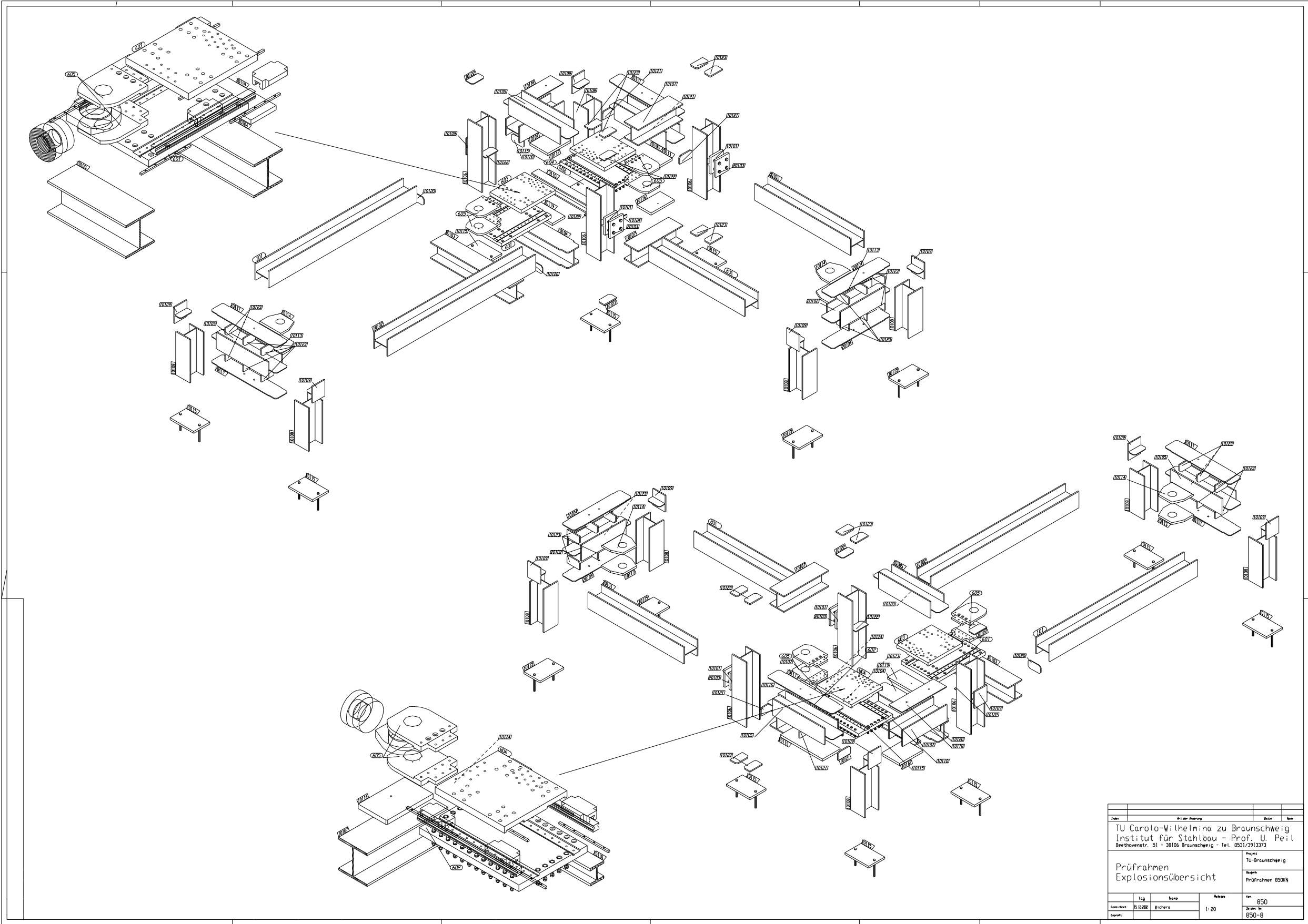


Datum	Art der Mitteilung			Betreff	Nr.
	TU Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig Institut für Stahlbau - Prof. U. Peil Bertnovenstr. 51 - 38106 Braunschweig - Tel. 0531/391373				
	Haltebleche für Lager- und Prüfteile			Projekt: TU-Braunschweig Bauplan: Prüfrahmen 850KH	
Gesamtzahl:	Tage	Name	Rechnen		ten
	15.12.2002	Viehers	I : 5		850
Sonderz.			I : 1		850-6
					850-6

A7 Perspektive



A8 Explosionszeichnung



A9 Zugversuchsergebnisse für Schweißproben mit anfänglicher Probentrennung

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Zugversuche aus den Schweißproben mit anfänglicher Probentrennung dargestellt.

Blechstärke : 6,0 mm
Werkstoffgüte : S355J2G3
Hersteller : Ilseburger Grobblech GmbH

Abkürzungen:

a_B Dicke nach dem Bruch
 b_B Breite nach dem Bruch
 A Bruchdehnung
 F_m Höchstzugkraft
 L_0 Anfangsmesslänge
 L_u Messlänge nach dem Bruch
 R_m Zugfestigkeit
 S_0 Anfangsquerschnitt
 S_u kleinste Querschnittsfläche nach dem Bruch
 Z Brucheinschnürung

Syntax-Schweißprobenbezeichnung: SE1-D6-F0,25-A0,1

SE1 Schweißprobe, einachsige Beanspruchung, Versuch 1
D6 Blechdicke 6 mm
F0,25 Frequenz 0,25 Hz
A0,1 Bewegungsamplitude $\pm 0,1$ mm

Syntax-Zugprobenbezeichnung: Z1Q-D6-F0,25-A0,1-T1

Z1Q Zugprobe, Versuch 1, Beanspruchungsrichtung der Schweißnaht in Querrichtung
D6 Blechdicke 6 mm
F0,25 Frequenz 0,25 Hz
A0,1 Bewegungsamplitude $\pm 0,1$ mm
T1 Teilprobe Nr. 1

Schweißprobe-Nr.: SE1-D6-F0,25-A0,1

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z1Q-D6-F0,25-A0,1-T1	Nahtmitte	5,950	5,942	5,946	20,087	20,058	20,073
Z1Q-D6-F0,25-A0,1-T2	Nahtmitte	5,956	5,960	5,958	20,073	20,072	20,073
Z1Q-D6-F0,25-A0,1-T3	Nahtmitte	5,943	5,953	5,948	20,063	20,069	20,066
Z1Q-D6-F0,25-A0,1-T4	Nahtmitte	5,951	5,939	5,945	20,073	20,069	20,071
Z1Q-D6-F0,25-A0,1-T5	Nahtmitte	5,948	5,950	5,949	20,068	20,070	20,069
Z1Q-D6-F0,25-A0,1-T6	Nahtmitte	5,953	5,948	5,951	20,091	20,083	20,087

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z1Q-D6-F0,25-A0,1-T1	3,920	14,650	61,500	75,440	119,393	57,428
Z1Q-D6-F0,25-A0,1-T2	3,820	14,600	61,430	74,890	119,457	55,772
Z1Q-D6-F0,25-A0,1-T3	5,810	19,240	61,600	71,920	119,431	111,784
Z1Q-D6-F0,25-A0,1-T4	5,880	19,300	61,600	74,770	119,529	113,484
Z1Q-D6-F0,25-A0,1-T5	3,650	14,850	61,950	75,960	119,571	54,203
Z1Q-D6-F0,25-A0,1-T6	3,930	14,140	61,900	76,380	119,542	55,570

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung	Bruch- dehnung	Höchst- zugkraft	Zugfestigkeit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
Z1Q-D6-F0,25-A0,1-T1	51,900	22,667	64738	542,226
Z1Q-D6-F0,25-A0,1-T2	53,312	21,911	65104	544,998
Z1Q-D6-F0,25-A0,1-T3	6,402	16,753	64991	544,174
Z1Q-D6-F0,25-A0,1-T4	5,057	21,380	63270	529,327
Z1Q-D6-F0,25-A0,1-T5	54,669	22,615	65749	549,873
Z1Q-D6-F0,25-A0,1-T6	53,514	23,393	65506	547,974
Mittelwert	37,476	21,453	64893	543,095
Varianz	605,642	5,778	764157	52,970
Standardabweichung	24,610	2,404	874	7,278

Schweißprobe-Nr.: SE1-D6-F0,25-A0,2

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z1Q-D6-F0,25-A0,2-T1	Nahtmitte	5,931	5,929	5,930	20,098	20,105	20,102
Z1Q-D6-F0,25-A0,2-T2	Nahtmitte	5,960	5,972	5,966	20,105	20,102	20,104
Z1Q-D6-F0,25-A0,2-T3	Nahtmitte	5,948	5,950	5,949	20,096	20,097	20,097
Z1Q-D6-F0,25-A0,2-T4	Nahtmitte	5,955	5,948	5,952	20,095	20,100	20,098
Z1Q-D6-F0,25-A0,2-T5	Nahtmitte	5,950	5,945	5,948	20,096	20,100	20,098
Z1Q-D6-F0,25-A0,2-T6	Nahtmitte	5,936	5,931	5,934	20,099	20,078	20,089

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z1Q-D6-F0,25-A0,2-T1	5,880	19,600	61,950	66,540	119,202	115,248
Z1Q-D6-F0,25-A0,2-T2	5,790	19,840	61,950	67,450	119,937	114,874
Z1Q-D6-F0,25-A0,2-T3	5,670	19,710	62,000	68,460	119,554	111,756
Z1Q-D6-F0,25-A0,2-T4	5,800	19,840	61,500	66,620	119,610	115,072
Z1Q-D6-F0,25-A0,2-T5	5,890	19,630	61,540	66,820	119,533	115,621
Z1Q-D6-F0,25-A0,2-T6	5,880	19,660	61,740	66,580	119,195	115,601

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung Z [%]	Bruch- dehnung A [%]	Höchst- zugkraft F _m [N]	Zugfestigkeit R _m [N/mm ²]
Z1Q-D6-F0,25-A0,2-T1	3,317	7,409	57573	482,987
Z1Q-D6-F0,25-A0,2-T2	4,222	8,878	58701	489,430
Z1Q-D6-F0,25-A0,2-T3	6,523	10,419	62887	526,013
Z1Q-D6-F0,25-A0,2-T4	3,794	8,325	55157	461,139
Z1Q-D6-F0,25-A0,2-T5	3,273	8,580	60028	502,188
Z1Q-D6-F0,25-A0,2-T6	3,015	7,839	53658	450,169
Mittelwert	4,024	8,575	58001	485,321
Varianz	1,684	1,091	11120979	756,612
Standardabweichung	1,298	1,045	3335	27,507

Schweißprobe-Nr.: SE1-D6-F0,25-A0,3

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z1Q-D6-F0,25-A0,3-T1	Nahtmitte	5,954	5,948	5,951	20,061	20,067	20,064
Z1Q-D6-F0,25-A0,3-T2	Nahtmitte	5,951	5,948	5,950	20,054	20,057	20,056
Z1Q-D6-F0,25-A0,3-T3	Nahtmitte	5,943	5,947	5,945	20,059	20,057	20,058
Z1Q-D6-F0,25-A0,3-T4	Nahtmitte	5,951	5,957	5,954	20,053	20,072	20,063
Z1Q-D6-F0,25-A0,3-T5	Nahtmitte	5,973	5,958	5,966	20,053	20,055	20,054
Z1Q-D6-F0,25-A0,3-T6	Nahtmitte	5,951	5,954	5,953	20,058	20,052	20,055

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z1Q-D6-F0,25-A0,3-T1	5,820	19,740	61,430	65,720	119,401	114,887
Z1Q-D6-F0,25-A0,3-T2	5,920	19,600	61,430	65,290	119,320	116,032
Z1Q-D6-F0,25-A0,3-T3	5,930	19,800	61,420	64,950	119,245	117,414
Z1Q-D6-F0,25-A0,3-T4	5,900	19,750	61,440	64,960	119,452	116,525
Z1Q-D6-F0,25-A0,3-T5	5,880	19,860	61,520	65,300	119,632	116,777
Z1Q-D6-F0,25-A0,3-T6	5,880	19,770	61,650	65,950	119,377	116,248

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung	Bruch- dehnung	Höchst- zugkraft	Zugfestigkeit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
Z1Q-D6-F0,25-A0,3-T1	3,781	6,984	58570	490,532
Z1Q-D6-F0,25-A0,3-T2	2,756	6,284	52267	438,040
Z1Q-D6-F0,25-A0,3-T3	1,535	5,747	49821	417,804
Z1Q-D6-F0,25-A0,3-T4	2,450	5,729	52354	438,284
Z1Q-D6-F0,25-A0,3-T5	2,387	6,144	53596	448,007
Z1Q-D6-F0,25-A0,3-T6	2,622	6,975	54658	457,859
Mittelwert	2,588	6,310	53544	448,421
Varianz	0,524	0,316	8682387	602,104
Standardabweichung	0,724	0,562	2947	24,538

Schweißprobe-Nr.: SE1-D6-F0,25-A0,4

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z1Q-D6-F0,25-A0,4-T1	Nahtmitte	5,950	5,942	5,946	20,087	20,058	20,073
Z1Q-D6-F0,25-A0,4-T2	Nahtmitte	5,956	5,960	5,958	20,073	20,072	20,073
Z1Q-D6-F0,25-A0,4-T3	Nahtmitte	5,943	5,953	5,948	20,063	20,069	20,066
Z1Q-D6-F0,25-A0,4-T4	Nahtmitte	5,951	5,939	5,945	20,073	20,069	20,071
Z1Q-D6-F0,25-A0,4-T5	Nahtmitte	5,948	5,950	5,949	20,068	20,070	20,069
Z1Q-D6-F0,25-A0,4-T6	Nahtmitte	5,953	5,948	5,951	20,091	20,083	20,087

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z1Q-D6-F0,25-A0,4-T1	5,900	19,870	61,520	65,230	119,351	117,233
Z1Q-D6-F0,25-A0,4-T2	5,900	19,980	61,520	63,190	119,592	117,882
Z1Q-D6-F0,25-A0,4-T3	5,880	19,950	61,420	62,650	119,353	117,306
Z1Q-D6-F0,25-A0,4-T4	5,890	19,970	61,440	63,750	119,322	117,623
Z1Q-D6-F0,25-A0,4-T5	5,950	20,050	61,430	63,320	119,390	119,298
Z1Q-D6-F0,25-A0,4-T6	5,910	20,030	61,440	62,700	119,528	118,377

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung Z [%]	Bruch- dehnung A [%]	Höchst- zugkraft F _m [N]	Zugfestigkeit R _m [N/mm ²]
Z1Q-D6-F0,25-A0,4-T1	1,775	6,031	42787	358,497
Z1Q-D6-F0,25-A0,4-T2	1,430	2,715	35778	299,167
Z1Q-D6-F0,25-A0,4-T3	1,715	2,003	35090	294,003
Z1Q-D6-F0,25-A0,4-T4	1,424	3,760	39174	328,305
Z1Q-D6-F0,25-A0,4-T5	0,078	3,077	34936	292,620
Z1Q-D6-F0,25-A0,4-T6	0,962	2,051	41731	349,132
Mittelwert	1,231	3,272	38249	320,287
Varianz	0,402	2,260	12126897	851,745
Standardabweichung	0,634	1,503	3482	29,185

Schweißprobe-Nr.: SE1-D6-F0,25-A0,5

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z1Q-D6-F0,25-A0,5-T1	Nahtmitte	5,925	5,911	5,918	20,078	20,066	20,072
Z1Q-D6-F0,25-A0,5-T2	Nahtmitte	5,928	5,930	5,929	20,059	20,051	20,055
Z1Q-D6-F0,25-A0,5-T3	Nahtmitte	5,938	5,943	5,941	20,064	20,073	20,069
Z1Q-D6-F0,25-A0,5-T4	Nahtmitte	5,947	5,943	5,945	20,073	20,075	20,074
Z1Q-D6-F0,25-A0,5-T5	Nahtmitte	5,952	5,955	5,954	20,083	20,075	20,079
Z1Q-D6-F0,25-A0,5-T6	Nahtmitte	5,944	5,950	5,947	20,091	20,065	20,078

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z1Q-D6-F0,25-A0,5-T1	5,900	20,070	61,460	62,710	118,786	118,413
Z1Q-D6-F0,25-A0,5-T2	5,910	20,030	61,450	63,270	118,906	118,377
Z1Q-D6-F0,25-A0,5-T3	5,930	20,020	61,440	62,210	119,217	118,719
Z1Q-D6-F0,25-A0,5-T4	5,950	19,980	61,490	62,760	119,340	118,881
Z1Q-D6-F0,25-A0,5-T5	5,910	19,970	61,500	63,320	119,540	118,023
Z1Q-D6-F0,25-A0,5-T6	5,900	19,980	61,450	64,230	119,404	117,882

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung	Bruch- dehnung	Höchst- zugkraft	Zugfestigkeit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
Z1Q-D6-F0,25-A0,5-T1	0,314	2,034	15185	127,835
Z1Q-D6-F0,25-A0,5-T2	0,445	2,962	22880	192,421
Z1Q-D6-F0,25-A0,5-T3	0,418	1,253	24823	208,217
Z1Q-D6-F0,25-A0,5-T4	0,385	2,065	25563	214,203
Z1Q-D6-F0,25-A0,5-T5	1,270	2,959	43012	359,812
Z1Q-D6-F0,25-A0,5-T6	1,275	4,524	41039	343,699
Mittelwert	0,684	2,633	28750	241,031
Varianz	0,209	1,275	119693717	8324,477
Standardabweichung	0,457	1,129	10940	91,239

Schweißprobe-Nr.: SE1-D6-F0,25-A0,6

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z1Q-D6-F0,25-A0,6-T1	Nahtmitte	5,908	5,970	5,939	20,023	20,028	20,026
Z1Q-D6-F0,25-A0,6-T2	Nahtmitte	5,967	5,911	5,939	20,006	20,005	20,006
Z1Q-D6-F0,25-A0,6-T3	Nahtmitte	5,981	5,906	5,944	20,016	20,010	20,013
Z1Q-D6-F0,25-A0,6-T4	Nahtmitte	5,975	5,890	5,933	19,996	20,012	20,004
Z1Q-D6-F0,25-A0,6-T5	Nahtmitte	5,957	5,895	5,926	20,013	20,011	20,012
Z1Q-D6-F0,25-A0,6-T6	Nahtmitte	5,996	5,925	5,961	20,018	20,021	20,020

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z1Q-D6-F0,25-A0,6-T1	5,890	19,920	62,160	64,110	118,931	117,329
Z1Q-D6-F0,25-A0,6-T2	5,870	19,660	61,570	64,260	118,813	115,404
Z1Q-D6-F0,25-A0,6-T3	5,910	19,260	61,800	64,550	118,947	113,827
Z1Q-D6-F0,25-A0,6-T4	5,860	19,900	61,860	64,950	118,674	116,614
Z1Q-D6-F0,25-A0,6-T5	5,780	19,830	61,840	65,350	118,591	114,617
Z1Q-D6-F0,25-A0,6-T6	5,840	19,860	61,890	64,150	119,326	115,982

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung Z [%]	Bruch- dehnung A [%]	Höchst- zugkraft F _m [N]	Zugfestigkeit R _m [N/mm ²]
Z1Q-D6-F0,25-A0,6-T1	1,348	3,137	35822	301,199
Z1Q-D6-F0,25-A0,6-T2	2,869	4,369	44358	373,344
Z1Q-D6-F0,25-A0,6-T3	4,305	4,450	39686	333,644
Z1Q-D6-F0,25-A0,6-T4	1,736	4,995	40479	341,095
Z1Q-D6-F0,25-A0,6-T5	3,351	5,676	42724	360,263
Z1Q-D6-F0,25-A0,6-T6	2,802	3,652	39806	333,590
Mittelwert	2,735	4,380	40479	340,522
Varianz	1,158	0,828	8571219	621,803
Standardabweichung	1,076	0,910	2928	24,936

Schweißprobe-Nr.: SE1-D6-F0,25-A0,7

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z1Q-D6-F0,25-A0,7-T1	Nahtmitte	5,938	5,905	5,922	19,957	19,953	19,955
Z1Q-D6-F0,25-A0,7-T2	Nahtmitte	5,944	5,922	5,933	20,040	20,067	20,054
Z1Q-D6-F0,25-A0,7-T3	Nahtmitte	5,943	5,914	5,929	20,048	20,019	20,034
Z1Q-D6-F0,25-A0,7-T4	Nahtmitte	5,942	5,892	5,917	20,027	20,029	20,028
Z1Q-D6-F0,25-A0,7-T5	Nahtmitte	5,945	5,905	5,925	20,030	20,024	20,027
Z1Q-D6-F0,25-A0,7-T6	Nahtmitte	5,952	5,906	5,929	20,024	20,028	20,026

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z1Q-D6-F0,25-A0,7-T1	5,890	19,930	61,820	63,380	118,164	117,388
Z1Q-D6-F0,25-A0,7-T2	5,890	19,960	61,710	63,230	118,977	117,564
Z1Q-D6-F0,25-A0,7-T3	5,830	19,990	62,340	63,890	118,769	116,542
Z1Q-D6-F0,25-A0,7-T4	5,880	19,950	62,120	64,260	118,506	117,306
Z1Q-D6-F0,25-A0,7-T5	5,810	19,960	61,960	63,950	118,660	115,968
Z1Q-D6-F0,25-A0,7-T6	5,850	19,960	61,830	63,390	118,734	116,766

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung	Bruch- dehnung	Höchst- zugkraft	Zugfestigkeit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
Z1Q-D6-F0,25-A0,7-T1	0,657	2,523	5729	48,484
Z1Q-D6-F0,25-A0,7-T2	1,188	2,463	10440	87,748
Z1Q-D6-F0,25-A0,7-T3	1,875	2,486	16688	140,509
Z1Q-D6-F0,25-A0,7-T4	1,012	3,445	20003	168,794
Z1Q-D6-F0,25-A0,7-T5	2,269	3,212	30418	256,346
Z1Q-D6-F0,25-A0,7-T6	1,658	2,523	27261	229,597
Mittelwert	1,443	2,775	18423	155,246
Varianz	0,357	0,189	90472564	6420,840
Standardabweichung	0,597	0,435	9512	80,130

Schweißprobe-Nr.: SE1-D6-F0,25-A0,8

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z1Q-D6-F0,25-A0,8-T1	Br. Vorher						
Z1Q-D6-F0,25-A0,8-T2	Br. Vorher						
Z1Q-D6-F0,25-A0,8-T3	Nahtmitte	5,953	5,976	5,965	19,987	19,977	19,982
Z1Q-D6-F0,25-A0,8-T4	Nahtmitte	5,940	5,954	5,947	19,982	20,002	19,992
Z1Q-D6-F0,25-A0,8-T5	Nahtmitte	5,966	5,971	5,969	19,998	20,014	20,006
Z1Q-D6-F0,25-A0,8-T6	Nahtmitte	5,940	5,972	5,956	19,967	19,989	19,978

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z1Q-D6-F0,25-A0,8-T1						
Z1Q-D6-F0,25-A0,8-T2						
Z1Q-D6-F0,25-A0,8-T3	5,910	19,920	62,300	63,630	119,183	117,727
Z1Q-D6-F0,25-A0,8-T4	5,860	19,900	62,190	64,190	118,892	116,614
Z1Q-D6-F0,25-A0,8-T5	5,870	19,890	61,890	64,190	119,406	116,754
Z1Q-D6-F0,25-A0,8-T6	5,960	19,860	61,790	64,420	118,989	118,366

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung	Bruch- dehnung	Höchst- zugkraft	Zugfestigkeit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
Z1Q-D6-F0,25-A0,8-T1				
Z1Q-D6-F0,25-A0,8-T2				
Z1Q-D6-F0,25-A0,8-T3	1,221	2,135	10608	89,006
Z1Q-D6-F0,25-A0,8-T4	1,916	3,216	17245	145,047
Z1Q-D6-F0,25-A0,8-T5	2,221	3,716	20543	172,044
Z1Q-D6-F0,25-A0,8-T6	0,524	4,256	23914	200,977
Mittelwert	1,471	3,331	18078	151,768
Varianz	0,573	0,816	32209970	2272,264
Standardabweichung	0,757	0,903	5675	47,668

Schweißprobe-Nr.: SE1-D6-F0,50-A0,1

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z1Q-D6-F0,5-A0,1-T1	Nahtmitte	5,920	5,929	5,925	20,047	20,054	20,051
Z1Q-D6-F0,5-A0,1-T2	Nahtmitte	5,917	5,922	5,920	20,042	20,042	20,042
Z1Q-D6-F0,5-A0,1-T3	Nahtmitte	5,921	5,925	5,923	20,061	20,041	20,051
Z1Q-D6-F0,5-A0,1-T4	Grund	5,924	5,933	5,929	20,038	20,046	20,042
Z1Q-D6-F0,5-A0,1-T5	Grund	5,922	5,931	5,927	20,044	20,053	20,049
Z1Q-D6-F0,5-A0,1-T6	Grund	5,918	5,928	5,923	20,068	20,034	20,051

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z1Q-D6-F0,5-A0,1-T1	5,810	19,390	61,470	66,450	118,789	112,656
Z1Q-D6-F0,5-A0,1-T2	5,630	19,300	61,460	68,400	118,639	108,659
Z1Q-D6-F0,5-A0,1-T3	5,700	19,420	61,470	71,750	118,762	110,694
Z1Q-D6-F0,5-A0,1-T4	4,370	14,480	61,460	75,590	118,819	63,278
Z1Q-D6-F0,5-A0,1-T5	3,620	14,400	61,470	76,140	118,817	52,128
Z1Q-D6-F0,5-A0,1-T6	4,240	14,760	61,460	76,860	118,762	62,582

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung	Bruch- dehnung	Höchst- zugkraft	Zugfestigkeit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
Z1Q-D6-F0,5-A0,1-T1	5,163	8,102	58575	493,100
Z1Q-D6-F0,5-A0,1-T2	8,412	11,292	63165	532,415
Z1Q-D6-F0,5-A0,1-T3	6,793	16,724	64561	543,616
Z1Q-D6-F0,5-A0,1-T4	46,745	22,991	64715	544,652
Z1Q-D6-F0,5-A0,1-T5	56,128	23,865	64496	542,816
Z1Q-D6-F0,5-A0,1-T6	47,304	25,057	64469	542,842
Mittelwert	28,424	18,005	63330	533,240
Varianz	573,808	50,743	5745543	406,731
Standardabweichung	23,954	7,123	2397	20,168

Schweißprobe-Nr.: SE1-D6-F0,50-A0,2

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z1Q-D6-F0,5-A0,2-T1	Nahtmitte	5,949	5,931	5,940	20,021	20,035	20,028
Z1Q-D6-F0,5-A0,2-T2	Nahtmitte	5,929	5,935	5,932	20,020	20,017	20,019
Z1Q-D6-F0,5-A0,2-T3	Nahtmitte	5,941	5,935	5,938	20,026	20,024	20,025
Z1Q-D6-F0,5-A0,2-T4	Nahtmitte	5,927	5,932	5,930	20,032	20,017	20,025
Z1Q-D6-F0,5-A0,2-T5	Nahtmitte	5,931	5,929	5,930	20,035	20,020	20,028
Z1Q-D6-F0,5-A0,2-T6	Nahtmitte	5,915	5,918	5,917	20,044	20,015	20,030

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z1Q-D6-F0,5-A0,2-T1	5,810	19,780	61,510	64,660	118,966	114,922
Z1Q-D6-F0,5-A0,2-T2	5,660	19,800	61,510	67,640	118,750	112,068
Z1Q-D6-F0,5-A0,2-T3	5,860	19,780	61,480	65,740	118,908	115,911
Z1Q-D6-F0,5-A0,2-T4	5,760	19,770	61,480	66,330	118,735	113,875
Z1Q-D6-F0,5-A0,2-T5	5,820	19,680	61,310	65,130	118,763	114,538
Z1Q-D6-F0,5-A0,2-T6	5,670	19,630	61,380	67,730	118,505	111,302

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung	Bruch- dehnung	Höchst- zugkraft	Zugfestigkeit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
Z1Q-D6-F0,5-A0,2-T1	3,400	5,121	56001	470,730
Z1Q-D6-F0,5-A0,2-T2	5,627	9,966	63337	533,365
Z1Q-D6-F0,5-A0,2-T3	2,521	6,929	60045	504,968
Z1Q-D6-F0,5-A0,2-T4	4,093	7,889	61311	516,367
Z1Q-D6-F0,5-A0,2-T5	3,558	6,231	59197	498,446
Z1Q-D6-F0,5-A0,2-T6	6,078	10,345	62339	526,047
Mittelwert	4,213	7,747	60372	508,321
Varianz	1,889	4,312	6827046	505,606
Standardabweichung	1,374	2,076	2613	22,486

Schweißprobe-Nr.: SE1-D6-F0,50-A0,3

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z1Q-D6-F0,5-A0,3-T1	Nahtmitte	5,918	5,919	5,919	20,042	20,038	20,040
Z1Q-D6-F0,5-A0,3-T2	Nahtmitte	5,917	5,945	5,931	20,020	20,026	20,023
Z1Q-D6-F0,5-A0,3-T3	Ausschuß						
Z1Q-D6-F0,5-A0,3-T4	Nahtmitte	5,923	5,913	5,918	20,029	20,037	20,033
Z1Q-D6-F0,5-A0,3-T5	Nahtmitte	5,925	5,929	5,927	20,023	20,037	20,030
Z1Q-D6-F0,5-A0,3-T6	Nahtmitte	5,924	5,916	5,924	20,044	20,023	20,034

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z1Q-D6-F0,5-A0,3-T1	5,880	20,000	61,560	62,900	118,607	117,600
Z1Q-D6-F0,5-A0,3-T2	5,840	19,800	61,570	65,140	118,756	115,632
Z1Q-D6-F0,5-A0,3-T3						
Z1Q-D6-F0,5-A0,3-T4	5,810	19,730	61,500	65,230	118,555	114,631
Z1Q-D6-F0,5-A0,3-T5	5,780	19,880	61,500	64,310	118,718	114,906
Z1Q-D6-F0,5-A0,3-T6	5,820	19,830	61,500	65,100	118,678	115,411

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung	Bruch- dehnung	Höchst- zugkraft	Zugfestigkeit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
Z1Q-D6-F0,5-A0,3-T1	0,849	2,177	38962	328,497
Z1Q-D6-F0,5-A0,3-T2	2,631	5,798	55306	465,710
Z1Q-D6-F0,5-A0,3-T3				
Z1Q-D6-F0,5-A0,3-T4	3,310	6,065	57248	482,880
Z1Q-D6-F0,5-A0,3-T5	3,210	4,569	52270	440,288
Z1Q-D6-F0,5-A0,3-T6	2,754	5,854	51151	431,005
Mittelwert	2,551	4,893	50987	429,676
Varianz	0,989	2,650	51031873	3620,149
Standardabweichung	0,994	1,628	7144	60,168

Schweißprobe-Nr.: SE1-D6-F0,50-A0,4

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z1Q-D6-F0,5-A0,4-T1	Nahtmitte	5,943	5,933	5,938	20,045	20,040	20,043
Z1Q-D6-F0,5-A0,4-T2	Nahtmitte	5,943	5,943	5,943	20,024	20,026	20,025
Z1Q-D6-F0,5-A0,4-T3	Nahtmitte	5,940	5,938	5,939	20,044	20,024	20,034
Z1Q-D6-F0,5-A0,4-T4	Nahtmitte	5,945	5,945	5,945	20,029	20,029	20,029
Z1Q-D6-F0,5-A0,4-T5	Nahtmitte	5,943	5,931	5,937	20,036	20,026	20,031
Z1Q-D6-F0,5-A0,4-T6	Nahtmitte	5,932	5,950	5,941	20,048	20,024	20,036

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z1Q-D6-F0,5-A0,4-T1	5,910	19,980	61,530	62,920	119,012	118,082
Z1Q-D6-F0,5-A0,4-T2	5,930	20,000	61,530	63,070	119,009	118,600
Z1Q-D6-F0,5-A0,4-T3	5,880	19,960	61,470	63,160	118,982	117,365
Z1Q-D6-F0,5-A0,4-T4	5,910	19,940	61,510	63,090	119,072	117,845
Z1Q-D6-F0,5-A0,4-T5	5,870	19,810	61,520	62,960	118,924	116,285
Z1Q-D6-F0,5-A0,4-T6	5,870	19,970	61,550	63,230	119,034	117,224

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung Z [%]	Bruch- dehnung A [%]	Höchst- zugkraft F _m [N]	Zugfestigkeit R _m [N/mm ²]
Z1Q-D6-F0,5-A0,4-T1	0,782	2,259	20420	171,579
Z1Q-D6-F0,5-A0,4-T2	0,343	2,503	38472	323,271
Z1Q-D6-F0,5-A0,4-T3	1,359	2,749	45176	379,688
Z1Q-D6-F0,5-A0,4-T4	1,030	2,569	37498	314,918
Z1Q-D6-F0,5-A0,4-T5	2,219	2,341	40144	337,560
Z1Q-D6-F0,5-A0,4-T6	1,521	2,729	48783	409,825
Mittelwert	1,209	2,525	38416	322,807
Varianz	0,421	0,040	96172030	6791,512
Standardabweichung	0,649	0,200	9807	82,411

Schweißprobe-Nr.: SE1-D6-F0,50-A0,5

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z1Q-D6-F0,5-A0,5-T1	Nahtmitte	5,948	5,957	5,953	20,038	20,044	20,041
Z1Q-D6-F0,5-A0,5-T2	Nahtmitte	5,960	5,948	5,954	20,023	20,029	20,026
Z1Q-D6-F0,5-A0,5-T3	Nahtmitte	5,958	5,941	5,950	20,037	20,022	20,030
Z1Q-D6-F0,5-A0,5-T4	Nahtmitte	5,961	5,957	5,959	20,030	20,024	20,027
Z1Q-D6-F0,5-A0,5-T5	Nahtmitte	5,958	5,965	5,962	20,034	20,020	20,027
Z1Q-D6-F0,5-A0,5-T6	Nahtmitte	5,965	5,057	5,511	20,034	20,019	20,027

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z1Q-D6-F0,5-A0,5-T1	5,930	19,980	61,580	63,490	119,294	118,481
Z1Q-D6-F0,5-A0,5-T2	5,900	19,910	61,570	63,210	119,235	117,469
Z1Q-D6-F0,5-A0,5-T3	5,920	19,930	61,520	62,880	119,166	117,986
Z1Q-D6-F0,5-A0,5-T4	5,890	19,980	61,400	64,410	119,341	117,682
Z1Q-D6-F0,5-A0,5-T5	5,870	19,980	61,420	64,240	119,391	117,283
Z1Q-D6-F0,5-A0,5-T6	5,910	19,920	61,420	65,180	110,366	117,727

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung	Bruch- dehnung	Höchst- zugkraft	Zugfestigkeit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
Z1Q-D6-F0,5-A0,5-T1	0,681	3,102	30992	259,795
Z1Q-D6-F0,5-A0,5-T2	1,481	2,664	34146	286,376
Z1Q-D6-F0,5-A0,5-T3	0,990	2,211	31875	267,485
Z1Q-D6-F0,5-A0,5-T4	1,390	4,902	48800	408,913
Z1Q-D6-F0,5-A0,5-T5	1,766	4,591	44391	371,812
Z1Q-D6-F0,5-A0,5-T6	-6,670	6,122	40785	369,543
Mittelwert	-0,060	3,932	38498	327,321
Varianz	10,630	2,287	53046618	4047,185
Standardabweichung	3,260	1,512	7283	63,617

Schweißprobe-Nr.: SE1-D6-F0,50-A0,6

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z1Q-D6-F0,5-A0,6-T1	Br. Vorher						
Z1Q-D6-F0,5-A0,6-T2	Br. Vorher						
Z1Q-D6-F0,5-A0,6-T3	Nahtmitte	5,921	5,920	5,921	20,066	20,075	20,071
Z1Q-D6-F0,5-A0,6-T4	Nahtmitte	5,927	5,914	5,921	20,039	20,046	20,043
Z1Q-D6-F0,5-A0,6-T5	Nahtmitte	5,921	5,920	5,921	20,060	20,055	20,058
Z1Q-D6-F0,5-A0,6-T6	Nahtmitte	5,935	5,917	5,926	20,038	20,051	20,045

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z1Q-D6-F0,5-A0,6-T1						
Z1Q-D6-F0,5-A0,6-T2						
Z1Q-D6-F0,5-A0,6-T3	5,910	20,020	61,410	62,730	118,827	118,318
Z1Q-D6-F0,5-A0,6-T4	5,890	20,030	61,590	63,680	118,662	117,977
Z1Q-D6-F0,5-A0,6-T5	5,860	19,980	61,400	64,780	118,750	117,083
Z1Q-D6-F0,5-A0,6-T6	5,770	19,370	61,600	64,930	118,784	111,765

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung	Bruch- dehnung	Höchst- zugkraft	Zugfestigkeit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
Z1Q-D6-F0,5-A0,6-T1				
Z1Q-D6-F0,5-A0,6-T2				
Z1Q-D6-F0,5-A0,6-T3	0,429	2,149	6434	54,146
Z1Q-D6-F0,5-A0,6-T4	0,577	3,393	19084	160,827
Z1Q-D6-F0,5-A0,6-T5	1,404	5,505	45937	386,836
Z1Q-D6-F0,5-A0,6-T6	5,909	5,406	43809	368,813
Mittelwert	2,080	4,113	28816	242,656
Varianz	6,701	2,661	371194813	26311,914
Standardabweichung	2,589	1,631	19266	162,209

Schweißprobe-Nr.: SE1-D6-F0,50-A0,7

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z1Q-D6-F0,5-A0,7-T1	Br. Vorher						
Z1Q-D6-F0,5-A0,7-T2	Br. Vorher						
Z1Q-D6-F0,5-A0,7-T3	Br. Vorher						
Z1Q-D6-F0,5-A0,7-T4	Br. Vorher						
Z1Q-D6-F0,5-A0,7-T5	Nahtmitte	5,957	5,953	5,955	29,050	20,041	24,546
Z1Q-D6-F0,5-A0,7-T6	Nahtmitte	5,962	5,975	5,969	20,045	20,041	20,043

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z1Q-D6-F0,5-A0,7-T1						
Z1Q-D6-F0,5-A0,7-T2						
Z1Q-D6-F0,5-A0,7-T3						
Z1Q-D6-F0,5-A0,7-T4						
Z1Q-D6-F0,5-A0,7-T5	5,930	19,980	61,500	63,410	146,168	118,481
Z1Q-D6-F0,5-A0,7-T6	5,900	19,910	61,890	63,570	119,627	117,469

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung	Bruch- dehnung	Höchst- zugkraft	Zugfestigkeit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
Z1Q-D6-F0,5-A0,7-T1				
Z1Q-D6-F0,5-A0,7-T2				
Z1Q-D6-F0,5-A0,7-T3				
Z1Q-D6-F0,5-A0,7-T4				
Z1Q-D6-F0,5-A0,7-T5	18,942	3,106	33323	227,977
Z1Q-D6-F0,5-A0,7-T6	1,804	2,714	36345	303,820
Mittelwert	10,373	2,910	34834	265,898
Varianz	146,859	0,077	4566242	2876,124
Standardabweichung	12,119	0,277	2137	53,630

Schweißprobe-Nr.: SE1-D6-F0,75-A0,1

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z1Q-D6-F0,75-A0,1-T1	Grund	5,911	5,895	5,903	20,050	20,042	20,046
Z1Q-D6-F0,75-A0,1-T2	Grund	5,917	5,906	5,912	20,040	20,035	20,038
Z1Q-D6-F0,75-A0,1-T3	Grund	5,916	5,911	5,914	20,038	20,030	20,034
Z1Q-D6-F0,75-A0,1-T4	Grund	5,912	5,910	5,911	20,040	20,028	20,034
Z1Q-D6-F0,75-A0,1-T5	Grund	5,921	5,923	5,922	20,038	20,032	20,035
Z1Q-D6-F0,75-A0,1-T6	Grund	5,921	5,891	5,906	20,066	20,034	20,050

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z1Q-D6-F0,75-A0,1-T1	4,030	14,660	61,770	75,630	118,332	59,080
Z1Q-D6-F0,75-A0,1-T2	3,570	14,330	61,610	75,490	118,452	51,158
Z1Q-D6-F0,75-A0,1-T3	3,970	14,460	61,510	76,200	118,471	57,406
Z1Q-D6-F0,75-A0,1-T4	3,850	14,380	61,510	75,140	118,421	55,363
Z1Q-D6-F0,75-A0,1-T5	3,830	14,340	61,530	75,430	118,647	54,922
Z1Q-D6-F0,75-A0,1-T6	3,740	14,300	61,520	74,850	118,415	53,482

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung	Bruch- dehnung	Höchst- zugkraft	Zugfestigkeit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
Z1Q-D6-F0,75-A0,1-T1	50,073	22,438	63465	536,332
Z1Q-D6-F0,75-A0,1-T2	56,811	22,529	63619	537,088
Z1Q-D6-F0,75-A0,1-T3	51,544	23,882	63842	538,883
Z1Q-D6-F0,75-A0,1-T4	53,249	22,159	63663	537,599
Z1Q-D6-F0,75-A0,1-T5	53,710	22,591	63449	534,770
Z1Q-D6-F0,75-A0,1-T6	54,835	21,668	63245	534,095
Mittelwert	53,370	22,544	63547	536,461
Varianz	5,665	0,544	42639	3,206
Standardabweichung	2,380	0,738	206	1,790

Schweißprobe-Nr.: SE1-D6-F0,75-A0,2

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z1Q-D6-F0,75-A0,2-T1	Nahtmitte	5,954	5,952	5,953	20,025	20,023	20,024
Z1Q-D6-F0,75-A0,2-T2	Nahtmitte	5,951	5,948	5,950	20,011	20,004	20,008
Z1Q-D6-F0,75-A0,2-T3	Nahtmitte	5,948	5,943	5,946	20,015	20,011	20,013
Z1Q-D6-F0,75-A0,2-T4	Nahtmitte	5,948	5,928	5,938	20,018	20,016	20,017
Z1Q-D6-F0,75-A0,2-T5	Nahtmitte	5,942	5,925	5,934	20,029	20,019	20,024
Z1Q-D6-F0,75-A0,2-T6	Nahtmitte	5,926	5,918	5,922	20,046	20,006	20,026

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z1Q-D6-F0,75-A0,2-T1	5,900	19,970	61,520	64,100	119,203	117,823
Z1Q-D6-F0,75-A0,2-T2	5,860	19,850	61,610	65,570	119,035	116,321
Z1Q-D6-F0,75-A0,2-T3	5,780	19,810	61,500	65,640	118,987	114,502
Z1Q-D6-F0,75-A0,2-T4	5,900	19,570	61,580	64,940	118,861	115,463
Z1Q-D6-F0,75-A0,2-T5	5,890	19,780	61,550	65,510	118,812	116,504
Z1Q-D6-F0,75-A0,2-T6	5,790	19,630	61,500	66,570	118,594	113,658

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung	Bruch- dehnung	Höchst- zugkraft	Zugfestigkeit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
Z1Q-D6-F0,75-A0,2-T1	1,158	4,194	46668	391,501
Z1Q-D6-F0,75-A0,2-T2	2,280	6,428	51462	432,328
Z1Q-D6-F0,75-A0,2-T3	3,770	6,732	58575	492,279
Z1Q-D6-F0,75-A0,2-T4	2,859	5,456	52248	439,572
Z1Q-D6-F0,75-A0,2-T5	1,943	6,434	53031	446,342
Z1Q-D6-F0,75-A0,2-T6	4,162	8,244	59261	499,697
Mittelwert	2,695	6,248	53541	450,287
Varianz	1,287	1,826	22310375	1622,679
Standardabweichung	1,135	1,351	4723	40,282

Schweißprobe-Nr.: SE1-D6-F0,75-A0,3

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z1Q-D6-F0,75-A0,3-T1	Nahtmitte	5,938	5,922	5,930	20,020	20,011	20,016
Z1Q-D6-F0,75-A0,3-T2	Nahtmitte	5,925	5,934	5,930	20,014	20,020	20,017
Z1Q-D6-F0,75-A0,3-T3	Nahtmitte	5,926	5,922	5,924	20,025	20,026	20,026
Z1Q-D6-F0,75-A0,3-T4	Nahtmitte	5,919	5,915	5,917	20,011	20,040	20,026
Z1Q-D6-F0,75-A0,3-T5	Nahtmitte	5,920	5,922	5,921	20,016	20,027	20,022
Z1Q-D6-F0,75-A0,3-T6	Nahtmitte	5,928	5,920	5,924	20,035	20,019	20,027

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z1Q-D6-F0,75-A0,3-T1	5,900	20,000	61,540	63,600	118,692	118,000
Z1Q-D6-F0,75-A0,3-T2	5,800	19,700	61,600	66,250	118,691	114,260
Z1Q-D6-F0,75-A0,3-T3	5,730	19,840	61,600	65,930	118,631	113,683
Z1Q-D6-F0,75-A0,3-T4	5,780	19,900	61,650	64,430	118,491	115,022
Z1Q-D6-F0,75-A0,3-T5	5,800	19,880	61,440	64,270	118,547	115,304
Z1Q-D6-F0,75-A0,3-T6	5,790	19,680	61,420	66,200	118,640	113,947

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung Z [%]	Bruch- dehnung A [%]	Höchst- zugkraft F _m [N]	Zugfestigkeit R _m [N/mm ²]
Z1Q-D6-F0,75-A0,3-T1	0,583	3,347	32812	276,447
Z1Q-D6-F0,75-A0,3-T2	3,733	7,549	60265	507,748
Z1Q-D6-F0,75-A0,3-T3	4,171	7,029	58971	497,096
Z1Q-D6-F0,75-A0,3-T4	2,928	4,509	52829	445,849
Z1Q-D6-F0,75-A0,3-T5	2,736	4,606	52970	446,826
Z1Q-D6-F0,75-A0,3-T6	3,955	7,782	58909	496,536
Mittelwert	3,018	5,804	52793	445,083
Varianz	1,747	3,521	106135382	7544,282
Standardabweichung	1,322	1,876	10302	86,858

Schweißprobe-Nr.: SE1-D6-F0,75-A0,4

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z1Q-D6-F0,75-A0,4-T1	Nahtmitte	5,903	5,886	5,895	20,042	20,044	20,043
Z1Q-D6-F0,75-A0,4-T2	Nahtmitte	5,890	5,905	5,898	20,016	20,025	20,021
Z1Q-D6-F0,75-A0,4-T3	Nahtmitte	5,917	5,908	5,913	20,011	20,004	20,008
Z1Q-D6-F0,75-A0,4-T4	Nahtmitte	5,909	5,902	5,906	20,024	20,011	20,018
Z1Q-D6-F0,75-A0,4-T5	Nahtmitte	5,905	5,875	5,890	20,041	20,042	20,042
Z1Q-D6-F0,75-A0,4-T6	Nahtmitte	5,882	5,909	5,896	20,043	20,040	20,042

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z1Q-D6-F0,75-A0,4-T1	5,840	20,000	61,510	62,260	118,143	116,800
Z1Q-D6-F0,75-A0,4-T2	5,850	19,850	61,510	62,900	118,071	116,123
Z1Q-D6-F0,75-A0,4-T3	5,800	19,890	61,610	64,110	118,294	115,362
Z1Q-D6-F0,75-A0,4-T4	5,840	19,850	61,550	65,580	118,213	115,924
Z1Q-D6-F0,75-A0,4-T5	5,820	19,870	61,580	65,230	118,044	115,643
Z1Q-D6-F0,75-A0,4-T6	5,780	19,820	61,570	66,190	118,155	114,560

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung	Bruch- dehnung	Höchst- zugkraft	Zugfestigkeit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
Z1Q-D6-F0,75-A0,4-T1	1,137	1,219	11500	97,339
Z1Q-D6-F0,75-A0,4-T2	1,650	2,260	18330	155,246
Z1Q-D6-F0,75-A0,4-T3	2,479	4,058	48543	410,358
Z1Q-D6-F0,75-A0,4-T4	1,937	6,548	54686	462,604
Z1Q-D6-F0,75-A0,4-T5	2,034	5,927	55275	468,256
Z1Q-D6-F0,75-A0,4-T6	3,043	7,504	52038	440,423
Mittelwert	2,047	4,586	40062	339,038
Varianz	0,435	6,237	389743270	27905,826
Standardabweichung	0,660	2,497	19742	167,050

Schweißprobe-Nr.: SE1-D6-F0,75-A0,5

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z1Q-D6-F0,75-A0,5-T1	Br. Vorher						
Z1Q-D6-F0,75-A0,5-T2	Br. Vorher						
Z1Q-D6-F0,75-A0,5-T3	Nahtmitte	5,959	5,933	5,946	20,068	20,060	20,064
Z1Q-D6-F0,75-A0,5-T4	Nahtmitte	5,947	5,938	5,943	20,057	20,058	20,058
Z1Q-D6-F0,75-A0,5-T5	Nahtmitte	5,959	5,937	5,948	20,057	20,060	20,059
Z1Q-D6-F0,75-A0,5-T6	Nahtmitte	5,944	5,968	5,956	20,060	20,070	20,065

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z1Q-D6-F0,75-A0,5-T1						
Z1Q-D6-F0,75-A0,5-T2						
Z1Q-D6-F0,75-A0,5-T3	5,880	20,010	61,580	62,450	119,301	117,659
Z1Q-D6-F0,75-A0,5-T4	5,870	20,030	61,560	62,450	119,192	117,576
Z1Q-D6-F0,75-A0,5-T5	5,870	20,010	61,560	63,120	119,308	117,459
Z1Q-D6-F0,75-A0,5-T6	5,870	19,900	61,590	65,270	119,507	116,813

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung	Bruch- dehnung	Höchst- zugkraft	Zugfestigkeit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
Z1Q-D6-F0,75-A0,5-T1				
Z1Q-D6-F0,75-A0,5-T2				
Z1Q-D6-F0,75-A0,5-T3	1,376	1,413	13652	114,434
Z1Q-D6-F0,75-A0,5-T4	1,355	1,446	17132	143,735
Z1Q-D6-F0,75-A0,5-T5	1,550	2,534	20747	173,895
Z1Q-D6-F0,75-A0,5-T6	2,254	5,975	51295	429,221
Mittelwert	1,634	2,842	25707	215,321
Varianz	0,179	4,634	299400331	20924,095
Standardabweichung	0,423	2,153	17303	144,652

Schweißprobe-Nr.: SE1-D6-F1,00-A0,1

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z1Q-D6-F1,0-A0,1-T1	Nahtmitte	5,894	5,893	5,894	20,073	20,082	20,078
Z1Q-D6-F1,0-A0,1-T2	Nahtmitte	5,911	5,913	5,912	20,065	20,070	20,068
Z1Q-D6-F1,0-A0,1-T3	Grund	5,921	5,918	5,920	20,067	20,066	20,067
Z1Q-D6-F1,0-A0,1-T4	Grund	5,927	5,927	5,927	20,060	20,069	20,065
Z1Q-D6-F1,0-A0,1-T5	Grund	5,927	5,933	5,930	20,068	20,071	20,070
Z1Q-D6-F1,0-A0,1-T6	Grund	5,924	5,936	5,930	20,091	20,060	20,076

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z1Q-D6-F1,0-A0,1-T1	5,760	19,390	61,630	68,420	118,327	111,686
Z1Q-D6-F1,0-A0,1-T2	5,680	19,360	61,600	71,570	118,639	109,965
Z1Q-D6-F1,0-A0,1-T3	3,990	14,390	61,460	73,480	118,784	57,416
Z1Q-D6-F1,0-A0,1-T4	3,680	14,430	61,480	73,910	118,922	53,102
Z1Q-D6-F1,0-A0,1-T5	3,900	14,300	61,480	74,290	119,012	55,770
Z1Q-D6-F1,0-A0,1-T6	3,890	14,460	61,760	75,980	119,048	56,249

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung	Bruch- dehnung	Höchst- zugkraft	Zugfestigkeit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
Z1Q-D6-F1,0-A0,1-T1	5,612	11,017	61913	523,238
Z1Q-D6-F1,0-A0,1-T2	7,311	16,185	63369	534,133
Z1Q-D6-F1,0-A0,1-T3	51,663	19,557	63766	536,825
Z1Q-D6-F1,0-A0,1-T4	55,347	20,218	63757	536,123
Z1Q-D6-F1,0-A0,1-T5	53,139	20,836	64345	540,659
Z1Q-D6-F1,0-A0,1-T6	52,751	23,025	64510	541,884
Mittelwert	37,637	18,473	63610	535,477
Varianz	584,873	18,269	866812	44,349
Standardabweichung	24,184	4,274	931	6,659

Schweißprobe-Nr.: SE2-D6-F1,00-A0,1

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z2Q-D6-F1,0-A0,1-T1	Nahtmitte	5,917	5,916	5,917	20,085	20,095	20,090
Z2Q-D6-F1,0-A0,1-T2	Nahtmitte	5,925	5,917	5,921	20,078	20,085	20,082
Z2Q-D6-F1,0-A0,1-T3	Grund	5,922	5,917	5,920	20,080	20,084	20,082
Z2Q-D6-F1,0-A0,1-T4	Grund	5,933	5,941	5,937	20,081	20,077	20,079
Z2Q-D6-F1,0-A0,1-T5	Grund	5,929	5,936	5,933	20,083	20,086	20,085
Z2Q-D6-F1,0-A0,1-T6	Grund	5,934	5,924	5,929	20,098	20,070	20,084

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z2Q-D6-F1,0-A0,1-T1	5,860	19,320	61,760	65,290	118,862	113,215
Z2Q-D6-F1,0-A0,1-T2	5,830	19,270	61,880	67,740	118,903	112,344
Z2Q-D6-F1,0-A0,1-T3	3,850	14,720	61,870	75,950	118,875	56,672
Z2Q-D6-F1,0-A0,1-T4	3,620	14,850	61,870	74,890	119,209	53,757
Z2Q-D6-F1,0-A0,1-T5	3,360	14,880	61,870	75,100	119,151	49,997
Z2Q-D6-F1,0-A0,1-T6	3,820	14,440	61,870	75,240	119,078	55,161

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung Z [%]	Bruch- dehnung A [%]	Höchst- zugkraft F _m [N]	Zugfestigkeit R _m [N/mm ²]
Z2Q-D6-F1,0-A0,1-T1	4,751	5,716	49823	419,165
Z2Q-D6-F1,0-A0,1-T2	5,516	9,470	60571	509,417
Z2Q-D6-F1,0-A0,1-T3	52,327	22,757	64108	539,287
Z2Q-D6-F1,0-A0,1-T4	54,905	21,044	64023	537,065
Z2Q-D6-F1,0-A0,1-T5	58,039	21,384	64204	538,844
Z2Q-D6-F1,0-A0,1-T6	53,677	21,610	64015	537,589
Mittelwert	38,202	16,997	61124	513,561
Varianz	659,767	54,801	32634230	2271,725
Standardabweichung	25,686	7,403	5713	47,663

Schweißprobe-Nr.: SE3-D6-F1,00-A0,1

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z3Q-D6-F1,0-A0,1-T1	Nahtmitte	5,947	5,953	5,950	20,027	20,022	20,025
Z3Q-D6-F1,0-A0,1-T2	Grund	5,952	5,952	5,952	20,028	20,026	20,027
Z3Q-D6-F1,0-A0,1-T3	Grund	5,953	5,957	5,955	20,022	20,024	20,023
Z3Q-D6-F1,0-A0,1-T4	Grund	5,934	5,953	5,944	20,044	20,045	20,045
Z3Q-D6-F1,0-A0,1-T5	Grund	5,944	5,948	5,946	20,090	20,085	20,088
Z3Q-D6-F1,0-A0,1-T6	Grund	5,947	5,950	5,949	20,103	20,073	20,088

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z3Q-D6-F1,0-A0,1-T1	5,830	19,900	61,650	66,210	119,146	116,017
Z3Q-D6-F1,0-A0,1-T2	3,460	14,440	61,640	75,690	119,201	49,962
Z3Q-D6-F1,0-A0,1-T3	3,630	14,480	61,640	73,990	119,237	52,562
Z3Q-D6-F1,0-A0,1-T4	3,620	14,500	61,640	75,610	119,134	52,490
Z3Q-D6-F1,0-A0,1-T5	3,480	14,420	61,640	74,110	119,440	50,182
Z3Q-D6-F1,0-A0,1-T6	3,770	14,860	61,650	74,710	119,493	56,022

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung	Bruch- dehnung	Höchst- zugkraft	Zugfestigkeit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
Z3Q-D6-F1,0-A0,1-T1	2,626	7,397	55407	465,035
Z3Q-D6-F1,0-A0,1-T2	58,085	22,794	63911	536,163
Z3Q-D6-F1,0-A0,1-T3	55,918	20,036	63973	536,520
Z3Q-D6-F1,0-A0,1-T4	55,941	22,664	64277	539,533
Z3Q-D6-F1,0-A0,1-T5	57,986	20,230	64299	538,336
Z3Q-D6-F1,0-A0,1-T6	53,117	21,184	64265	537,812
Mittelwert	47,279	19,051	62689	525,567
Varianz	481,808	33,959	12753417	880,870
Standardabweichung	21,950	5,827	3571	29,679

Schweißprobe-Nr.: SE1-D6-F1,00-A0,2

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z1Q-D6-F1,0-A0,2-T1	Nahtmitte	5,957	5,951	5,954	20,019	20,009	20,014
Z1Q-D6-F1,0-A0,2-T2	Nahtmitte	5,947	5,957	5,952	20,013	20,011	20,012
Z1Q-D6-F1,0-A0,2-T3	Nahtmitte	5,955	5,961	5,958	20,005	20,007	20,006
Z1Q-D6-F1,0-A0,2-T4	Nahtmitte	5,959	5,956	5,958	20,018	20,018	20,018
Z1Q-D6-F1,0-A0,2-T5	Nahtmitte	5,959	5,951	5,955	20,008	20,015	20,012
Z1Q-D6-F1,0-A0,2-T6	Grund	5,957	5,954	5,956	20,018	20,004	20,011

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z1Q-D6-F1,0-A0,2-T1	5,880	19,700	61,760	64,590	119,163	115,836
Z1Q-D6-F1,0-A0,2-T2	5,820	19,870	61,660	64,830	119,111	115,643
Z1Q-D6-F1,0-A0,2-T3	5,780	19,750	61,670	65,570	119,196	114,155
Z1Q-D6-F1,0-A0,2-T4	5,790	19,770	61,670	65,720	119,257	114,468
Z1Q-D6-F1,0-A0,2-T5	5,740	19,770	61,500	67,590	119,168	113,480
Z1Q-D6-F1,0-A0,2-T6	3,400	14,360	61,700	76,140	119,176	48,824

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung Z [%]	Bruch- dehnung A [%]	Höchst- zugkraft F _m [N]	Zugfestigkeit R _m [N/mm ²]
Z1Q-D6-F1,0-A0,2-T1	2,792	4,582	49440	414,893
Z1Q-D6-F1,0-A0,2-T2	2,912	5,141	53734	451,124
Z1Q-D6-F1,0-A0,2-T3	4,229	6,324	58298	489,095
Z1Q-D6-F1,0-A0,2-T4	4,016	6,567	57690	483,744
Z1Q-D6-F1,0-A0,2-T5	4,774	9,902	62398	523,612
Z1Q-D6-F1,0-A0,2-T6	59,032	23,404	63776	535,144
Mittelwert	12,959	9,320	57556	482,935
Varianz	510,044	51,030	28635805	2012,125
Standardabweichung	22,584	7,144	5351	44,857

Schweißprobe-Nr.: SE1-D6-F1,00-A0,3

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z1Q-D6-F1,0-A0,3-T1	Nahtmitte	5,924	5,951	5,938	20,021	20,031	20,026
Z1Q-D6-F1,0-A0,3-T2	Nahtmitte	5,924	5,945	5,935	20,021	20,021	20,021
Z1Q-D6-F1,0-A0,3-T3	Nahtmitte	5,931	5,953	5,942	20,024	20,018	20,021
Z1Q-D6-F1,0-A0,3-T4	Nahtmitte	5,928	5,950	5,939	20,011	20,018	20,015
Z1Q-D6-F1,0-A0,3-T5	Nahtmitte	5,935	5,944	5,940	20,020	20,020	20,020
Z1Q-D6-F1,0-A0,3-T6	Nahtmitte	5,935	5,935	5,935	20,030	20,016	20,023

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt S ₀	Quer- schnitt S _u
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	[mm ²]	[mm ²]
Z1Q-D6-F1,0-A0,3-T1	5,880	20,010	61,760	62,570	118,904	117,659
Z1Q-D6-F1,0-A0,3-T2	5,900	19,540	61,650	63,500	118,815	115,286
Z1Q-D6-F1,0-A0,3-T3	5,840	19,950	61,650	63,830	118,965	116,508
Z1Q-D6-F1,0-A0,3-T4	5,820	19,900	61,650	65,700	118,866	115,818
Z1Q-D6-F1,0-A0,3-T5	5,780	19,800	61,640	65,540	118,909	114,444
Z1Q-D6-F1,0-A0,3-T6	5,800	19,890	61,650	67,840	118,837	115,362

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung Z	Bruch- dehnung A	Höchst- zugkraft F _m	Zugfestigkeit R _m
	[%]	[%]	[N]	[N/mm ²]
Z1Q-D6-F1,0-A0,3-T1	1,048	1,312	11633	97,835
Z1Q-D6-F1,0-A0,3-T2	2,970	3,001	44858	377,546
Z1Q-D6-F1,0-A0,3-T3	2,065	3,536	49701	417,779
Z1Q-D6-F1,0-A0,3-T4	2,564	6,569	58617	493,135
Z1Q-D6-F1,0-A0,3-T5	3,755	6,327	57597	484,380
Z1Q-D6-F1,0-A0,3-T6	2,924	10,041	55908	470,461
Mittelwert	2,554	5,131	46386	390,189
Varianz	0,852	9,855	317409477	22461,065
Standardabweichung	0,923	3,139	17816	149,870

Schweißprobe-Nr.: SE1-D6-F1,00-A0,4

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z1Q-D6-F1,0-A0,4-T1	Br. Vorher						
Z1Q-D6-F1,0-A0,4-T2	Br. Vorher						
Z1Q-D6-F1,0-A0,4-T3	Br. Vorher						
Z1Q-D6-F1,0-A0,4-T4	Br. Vorher						
Z1Q-D6-F1,0-A0,4-T5	Nahtmitte	5,922	5,922	5,922	20,028	20,023	20,026
Z1Q-D6-F1,0-A0,4-T6	Nahtmitte	5,923	5,921	5,922	20,048	20,018	20,033

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z1Q-D6-F1,0-A0,4-T1						
Z1Q-D6-F1,0-A0,4-T2						
Z1Q-D6-F1,0-A0,4-T3						
Z1Q-D6-F1,0-A0,4-T4						
Z1Q-D6-F1,0-A0,4-T5	5,860	20,000	61,620	62,530	118,591	117,200
Z1Q-D6-F1,0-A0,4-T6	5,870	19,970	61,640	63,270	118,635	117,224

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung	Bruch- dehnung	Höchst- zugkraft	Zugfestigkeit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
Z1Q-D6-F1,0-A0,4-T1				
Z1Q-D6-F1,0-A0,4-T2				
Z1Q-D6-F1,0-A0,4-T3				
Z1Q-D6-F1,0-A0,4-T4				
Z1Q-D6-F1,0-A0,4-T5	1,173	1,477	18858	159,017
Z1Q-D6-F1,0-A0,4-T6	1,190	2,644	39020	328,907
Mittelwert	1,181	2,061	28939	243,962
Varianz	0,000	0,682	203253122	14431,256
Standardabweichung	0,012	0,826	14257	120,130

Schweißprobe-Nr.: SE1-D6-F1,75-A0,1

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z1Q-D6-F1,75-A0,1-T1	Nahtmitte	5,964	5,962	5,963	20,028	20,034	20,031
Z1Q-D6-F1,75-A0,1-T2	Grund	5,961	5,958	5,960	20,028	20,024	20,026
Z1Q-D6-F1,75-A0,1-T3	Grund	5,956	5,957	5,957	20,026	20,020	20,023
Z1Q-D6-F1,75-A0,1-T4	Nahtmitte	5,959	5,957	5,958	20,025	20,021	20,023
Z1Q-D6-F1,75-A0,1-T5	Nahtmitte	5,961	5,958	5,960	20,030	20,020	20,025
Z1Q-D6-F1,75-A0,1-T6	Grund	5,958	5,962	5,960	19,960	19,930	19,945

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z1Q-D6-F1,75-A0,1-T1	5,850	19,840	61,700	65,710	119,445	116,064
Z1Q-D6-F1,75-A0,1-T2	3,110	14,660	61,500	75,420	119,345	45,593
Z1Q-D6-F1,75-A0,1-T3	3,660	14,800	61,510	75,800	119,267	54,168
Z1Q-D6-F1,75-A0,1-T4	5,780	19,830	61,600	68,060	119,297	114,617
Z1Q-D6-F1,75-A0,1-T5	5,750	19,610	61,480	66,980	119,339	112,758
Z1Q-D6-F1,75-A0,1-T6	3,560	14,510	61,530	75,350	118,872	51,656

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung	Bruch- dehnung	Höchst- zugkraft	Zugfestigkeit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
Z1Q-D6-F1,75-A0,1-T1	2,830	6,499	50319	421,274
Z1Q-D6-F1,75-A0,1-T2	61,798	22,634	64228	538,171
Z1Q-D6-F1,75-A0,1-T3	54,583	23,232	64308	539,194
Z1Q-D6-F1,75-A0,1-T4	3,923	10,487	62261	521,899
Z1Q-D6-F1,75-A0,1-T5	5,515	8,946	60592	507,730
Z1Q-D6-F1,75-A0,1-T6	56,545	22,461	63824	536,913
Mittelwert	30,866	15,710	60922	510,863
Varianz	866,655	61,593	29028333	2076,951
Standardabweichung	29,439	7,848	5388	45,574

Schweißprobe-Nr.: SE1-D6-F1,75-A0,2

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z1Q-D6-F1,75-A0,2-T1	Nahtmitte	5,925	5,910	5,918	20,034	20,034	20,034
Z1Q-D6-F1,75-A0,2-T2	Br. Vorher						
Z1Q-D6-F1,75-A0,2-T3	Br. Vorher						
Z1Q-D6-F1,75-A0,2-T4	Nahtmitte	5,924	5,927	5,926	20,018	20,012	20,015
Z1Q-D6-F1,75-A0,2-T5	Nahtmitte	5,925	5,921	5,923	20,029	20,014	20,022
Z1Q-D6-F1,75-A0,2-T6	Nahtmitte	5,908	5,904	5,906	20,034	20,009	20,022

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z1Q-D6-F1,75-A0,2-T1	5,860	19,970	61,550	63,030	118,551	117,024
Z1Q-D6-F1,75-A0,2-T2						
Z1Q-D6-F1,75-A0,2-T3						
Z1Q-D6-F1,75-A0,2-T4	5,900	20,000	61,560	62,290	118,599	118,000
Z1Q-D6-F1,75-A0,2-T5	5,870	19,970	61,500	62,600	118,587	117,224
Z1Q-D6-F1,75-A0,2-T6	5,830	19,940	61,500	62,600	118,247	116,250

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung Z [%]	Bruch- dehnung A [%]	Höchst- zugkraft F _m [N]	Zugfestigkeit R _m [N/mm ²]
Z1Q-D6-F1,75-A0,2-T1	1,288	2,405	6164	51,994
Z1Q-D6-F1,75-A0,2-T2				
Z1Q-D6-F1,75-A0,2-T3				
Z1Q-D6-F1,75-A0,2-T4	0,505	1,186	11589	97,716
Z1Q-D6-F1,75-A0,2-T5	1,150	1,789	15026	126,708
Z1Q-D6-F1,75-A0,2-T6	1,689	1,789	15995	135,268
Mittelwert	1,158	1,792	12194	102,922
Varianz	0,242	0,248	19731583	1410,919
Standardabweichung	0,492	0,498	4442	37,562

Schweißprobe-Nr.: SE1-D6-F2,50-A0,1

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z1Q-D6-F2,5-A0,1-T1	Nahtmitte	5,921	5,898	5,910	20,031	20,036	20,034
Z1Q-D6-F2,5-A0,1-T2	Nahtmitte	5,943	5,908	5,926	20,022	20,026	20,024
Z1Q-D6-F2,5-A0,1-T3	Nahtmitte	5,940	5,922	5,931	20,025	20,020	20,023
Z1Q-D6-F2,5-A0,1-T4	Nahtmitte	5,951	5,919	5,935	20,038	20,033	20,036
Z1Q-D6-F2,5-A0,1-T5	Nahtmitte	5,947	5,927	5,937	20,042	20,038	20,040
Z1Q-D6-F2,5-A0,1-T6	Nahtmitte	5,955	5,919	5,937	20,068	20,036	20,052

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z1Q-D6-F2,5-A0,1-T1	5,900	19,990	61,600	62,910	118,388	117,941
Z1Q-D6-F2,5-A0,1-T2	5,810	19,980	61,500	62,830	118,652	116,084
Z1Q-D6-F2,5-A0,1-T3	5,890	19,970	61,340	62,060	118,753	117,623
Z1Q-D6-F2,5-A0,1-T4	5,900	19,940	61,380	62,580	118,911	117,646
Z1Q-D6-F2,5-A0,1-T5	5,850	19,960	61,380	62,960	118,977	116,766
Z1Q-D6-F2,5-A0,1-T6	5,860	19,960	61,400	62,710	119,049	116,966

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung	Bruch- dehnung	Höchst- zugkraft	Zugfestigkeit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
Z1Q-D6-F2,5-A0,1-T1	0,378	2,127	21409	180,838
Z1Q-D6-F2,5-A0,1-T2	2,165	2,163	38414	323,753
Z1Q-D6-F2,5-A0,1-T3	0,952	1,174	32338	272,312
Z1Q-D6-F2,5-A0,1-T4	1,064	1,955	44148	371,270
Z1Q-D6-F2,5-A0,1-T5	1,859	2,574	45562	382,946
Z1Q-D6-F2,5-A0,1-T6	1,750	2,134	37150	312,057
Mittelwert	1,361	2,021	36504	307,196
Varianz	0,454	0,214	77951619	5464,944
Standardabweichung	0,673	0,463	8829	73,925

Schweißprobe-Nr.: SE1-D6-F2,50-A0,2

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z1Q-D6-F2,5-A0,2-T1	Br. Vorher						
Z1Q-D6-F2,5-A0,2-T2	Br. Vorher						
Z1Q-D6-F2,5-A0,2-T3	Br. Vorher						
Z1Q-D6-F2,5-A0,2-T4	Br. Vorher						
Z1Q-D6-F2,5-A0,2-T5	Nahtmitte	5,908	5,910	5,909	20,051	20,044	20,048
Z1Q-D6-F2,5-A0,2-T6	Nahtmitte	5,918	5,894	5,906	20,067	20,048	20,058

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z1Q-D6-F2,5-A0,2-T1						
Z1Q-D6-F2,5-A0,2-T2						
Z1Q-D6-F2,5-A0,2-T3						
Z1Q-D6-F2,5-A0,2-T4						
Z1Q-D6-F2,5-A0,2-T5	5,800	20,000	61,700	63,310	118,461	116,000
Z1Q-D6-F2,5-A0,2-T6	5,820	19,960	61,550	62,870	118,460	116,167

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung	Bruch- dehnung	Höchst- zugkraft	Zugfestigkeit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
Z1Q-D6-F2,5-A0,2-T1				
Z1Q-D6-F2,5-A0,2-T2				
Z1Q-D6-F2,5-A0,2-T3				
Z1Q-D6-F2,5-A0,2-T4				
Z1Q-D6-F2,5-A0,2-T5	2,077	2,609	5847	49,358
Z1Q-D6-F2,5-A0,2-T6	1,935	2,145	10846	91,559
Mittelwert	2,006	2,377	8347	70,458
Varianz	0,010	0,108	12495001	890,441
Standardabweichung	0,100	0,329	3535	29,840

Schweißprobe-Nr.: SE1-D6-F4,00-A0,1

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z1Q-D6-F4,0-A0,1-T1	Nahtmitte	5,918	5,922	5,920	20,049	20,600	20,325
Z1Q-D6-F4,0-A0,1-T2	Nahtmitte	5,919	5,918	5,919	20,048	20,047	20,048
Z1Q-D6-F4,0-A0,1-T3	Nahtmitte	5,917	5,922	5,920	20,048	20,043	20,046
Z1Q-D6-F4,0-A0,1-T4	Nahtmitte	5,915	5,929	5,922	20,048	20,047	20,048
Z1Q-D6-F4,0-A0,1-T5	Nahtmitte	5,930	5,925	5,928	20,051	20,043	20,047
Z1Q-D6-F4,0-A0,1-T6	Nahtmitte	5,922	5,924	5,923	20,049	20,030	20,040

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z1Q-D6-F4,0-A0,1-T1	5,870	20,020	61,810	62,260	120,321	117,517
Z1Q-D6-F4,0-A0,1-T2	5,850	19,990	61,660	62,600	118,651	116,942
Z1Q-D6-F4,0-A0,1-T3	5,850	19,980	61,670	62,110	118,659	116,883
Z1Q-D6-F4,0-A0,1-T4	5,820	19,980	61,670	62,690	118,721	116,284
Z1Q-D6-F4,0-A0,1-T5	5,890	19,990	61,670	61,850	118,829	117,741
Z1Q-D6-F4,0-A0,1-T6	5,870	20,010	61,450	62,790	118,694	117,459

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung	Bruch- dehnung	Höchst- zugkraft	Zugfestigkeit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
Z1Q-D6-F4,0-A0,1-T1	2,330	0,728	11024	91,622
Z1Q-D6-F4,0-A0,1-T2	1,441	1,524	13351	112,523
Z1Q-D6-F4,0-A0,1-T3	1,497	0,713	10384	87,511
Z1Q-D6-F4,0-A0,1-T4	2,053	1,654	8476	71,394
Z1Q-D6-F4,0-A0,1-T5	0,915	0,292	13863	116,664
Z1Q-D6-F4,0-A0,1-T6	1,041	2,181	6974	58,756
Mittelwert	1,546	1,182	10679	89,745
Varianz	0,308	0,511	7212745	509,809
Standardabweichung	0,555	0,715	2686	22,579

Schweißprobe-Nr.: SE2-D6-F4,00-A0,1

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z2Q-D6-F4,0-A0,1-T1	Nahtmitte	5,930	5,935	5,933	20,024	20,031	20,028
Z2Q-D6-F4,0-A0,1-T2	Nahtmitte	5,940	5,940	5,940	20,018	20,010	20,014
Z2Q-D6-F4,0-A0,1-T3	Nahtmitte	5,944	5,940	5,942	20,015	20,015	20,015
Z2Q-D6-F4,0-A0,1-T4	Nahtmitte	5,934	5,937	5,936	20,020	20,014	20,017
Z2Q-D6-F4,0-A0,1-T5	Nahtmitte	5,930	5,936	5,933	20,032	20,010	20,021
Z2Q-D6-F4,0-A0,1-T6	Nahtmitte	5,922	5,929	5,926	20,042	20,015	20,029

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z2Q-D6-F4,0-A0,1-T1	5,840	19,980	61,520	62,320	118,813	116,683
Z2Q-D6-F4,0-A0,1-T2	5,870	19,870	61,540	62,180	118,883	116,637
Z2Q-D6-F4,0-A0,1-T3	5,860	19,940	61,580	62,500	118,929	116,848
Z2Q-D6-F4,0-A0,1-T4	5,850	19,960	61,580	62,120	118,811	116,766
Z2Q-D6-F4,0-A0,1-T5	5,840	19,940	61,580	62,230	118,785	116,450
Z2Q-D6-F4,0-A0,1-T6	5,840	20,000	61,600	62,420	118,679	116,800

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung Z [%]	Bruch- dehnung A [%]	Höchst- zugkraft F _m [N]	Zugfestigkeit R _m [N/mm ²]
Z2Q-D6-F4,0-A0,1-T1	1,793	1,300	13457	113,262
Z2Q-D6-F4,0-A0,1-T2	1,889	1,040	17982	151,258
Z2Q-D6-F4,0-A0,1-T3	1,750	1,494	14220	119,567
Z2Q-D6-F4,0-A0,1-T4	1,721	0,877	13924	117,195
Z2Q-D6-F4,0-A0,1-T5	1,966	1,056	17081	143,798
Z2Q-D6-F4,0-A0,1-T6	1,583	1,331	21614	182,122
Mittelwert	1,784	1,183	16380	137,867
Varianz	0,018	0,053	9938805	708,124
Standardabweichung	0,134	0,229	3153	26,611

Schweißprobe-Nr.: SE3-D6-F4,00-A0,1

Proben-Nr.	Bruchlage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Z3Q-D6-F4,0-A0,1-T1	Nahtmitte	5,965	5,965	5,965	20,018	20,032	20,025
Z3Q-D6-F4,0-A0,1-T2	Nahtmitte	5,966	5,954	5,960	20,020	20,022	20,021
Z3Q-D6-F4,0-A0,1-T3	Nahtmitte	5,974	5,953	5,964	20,016	20,016	20,016
Z3Q-D6-F4,0-A0,1-T4	Nahtmitte	5,967	5,974	5,971	20,019	20,022	20,021
Z3Q-D6-F4,0-A0,1-T5	Nahtmitte	5,968	5,966	5,967	20,025	20,023	20,024
Z3Q-D6-F4,0-A0,1-T6	Nahtmitte	5,958	5,963	5,961	20,047	20,015	20,031

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer- schnitt	Quer- schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Z3Q-D6-F4,0-A0,1-T1	5,860	19,980	61,600	61,980	119,449	117,083
Z3Q-D6-F4,0-A0,1-T2	5,880	19,940	61,600	62,220	119,325	117,247
Z3Q-D6-F4,0-A0,1-T3	5,870	19,960	61,450	61,920	119,365	117,165
Z3Q-D6-F4,0-A0,1-T4	5,890	19,980	61,450	61,910	119,532	117,682
Z3Q-D6-F4,0-A0,1-T5	5,900	19,960	61,500	62,180	119,483	117,764
Z3Q-D6-F4,0-A0,1-T6	5,870	19,980	61,500	61,810	119,395	117,283

Proben-Nr.	Bruch- ein- schnürung	Bruch- dehnung	Höchst- zugkraft	Zugfestigkeit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
Z3Q-D6-F4,0-A0,1-T1	1,981	0,617	10936	91,554
Z3Q-D6-F4,0-A0,1-T2	1,741	1,006	14593	122,296
Z3Q-D6-F4,0-A0,1-T3	1,843	0,765	9347	78,306
Z3Q-D6-F4,0-A0,1-T4	1,548	0,749	7869	65,832
Z3Q-D6-F4,0-A0,1-T5	1,439	1,106	9664	80,882
Z3Q-D6-F4,0-A0,1-T6	1,769	0,504	11951	100,097
Mittelwert	1,720	0,791	10727	89,828
Varianz	0,039	0,052	5538069	390,245
Standardabweichung	0,197	0,228	2353	19,755

A10 Zugversuchsergebnisse für Schweißproben mit anfänglicher Probentrennung

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Zugversuche aus den Schweißproben mit Eigensichersicherung dargestellt.

Blechstärke : 10,0 mm
Werkstoffgüte : S355J2G3
Hersteller : Ilseburger Grobblech GmbH

Abkürzungen:

a_B Dicke nach dem Bruch
 b_B Breite nach dem Bruch
 A Bruchdehnung
 F_m Höchstzugkraft
 L_0 Anfangsmesslänge
 L_u Messlänge nach dem Bruch
 R_m Zugfestigkeit
 S_0 Anfangsquerschnitt
 S_u kleinste Querschnittsfläche nach dem Bruch
 Z Brucheinschnürung

Syntax-Schweißprobenbezeichnung: SE1-D10-F0,25-A0,2-R6

SE1 Schweißprobe, einachsige Beanspruchung, Versuch 1
D10 Blechdicke 10 mm
F0,25 Frequenz 0,25 Hz
A0,2 Bewegungsamplitude $\pm 0,2$ mm
R6 Anrisstiefe 6,0 mm

Syntax-Zugprobenbezeichnung: ZK1Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T1

Z1Q Zugprobe, Kerbe, Versuch 1,
Beanspruchungsrichtung der Schweißnaht in Querrichtung
D10 Blechdicke 10 mm
F0,25 Frequenz 0,25 Hz
A0,2 Bewegungsamplitude $\pm 0,2$ mm
R6 Risstiefe 6 mm
T1 Teilprobe Nr. 1

Schweißprobe-Nr.: SE1-D10-F0,25-A0,2-R6

Proben-Nr.	Bruch-lage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
ZK1Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T1	Grund	9,740	9,748	9,744	25,009	25,009	25,009
ZK1Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T2	Grund	9,740	9,742	9,741	25,007	25,009	25,008
ZK1Q-D10-F0,25-A0,2-T6-T3	Grund	9,758	9,758	9,758	25,014	25,010	25,012
ZK1Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T4	Grund	9,749	9,750	9,750	25,012	25,010	25,011

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer-schnitt	Quer-schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
ZK1Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T1	5,600	16,930	88,720	114,760	243,688	94,808
ZK1Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T2	5,430	16,970	88,830	112,790	243,603	92,147
ZK1Q-D10-F0,25-A0,2-T6-T3	5,590	16,910	88,520	110,380	244,067	94,527
ZK1Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T4	6,080	17,140	88,730	115,010	243,845	104,211

Proben-Nr.	Bruch-einschnürung	Bruch-dehnung	Höchst-zugkraft	Zugfestig-keit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
ZK1Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T1	61,094	29,351	122897	504,322
ZK1Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T2	62,173	26,973	122990	504,879
ZK1Q-D10-F0,25-A0,2-T6-T3	61,270	24,695	122963	503,808
ZK1Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T4	57,263	29,618	123249	505,440
Mittelwert	60,450	27,659	123025	504,612
Varianz	4,738	5,319	23876	0,496
Standardabweichung	2,177	2,306	155	0,704

Schweißprobe-Nr.: SE2-D10-F0,25-A0,2-R6

Proben-Nr.	Bruch-lage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
ZK2Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T1	Grund	9,739	9,750	9,745	25,024	25,020	25,022
ZK2Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T2	Grund	9,757	9,743	9,750	25,033	25,028	25,031
ZK2Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T3	Grund	9,759	9,742	9,751	25,028	25,032	25,030
ZK2Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T4	Grund	9,742	9,750	9,746	25,024	25,030	25,027

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer-schnitt	Quer-schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
ZK2Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T1	5,320	17,050	88,350	112,810	243,827	90,706
ZK2Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T2	4,880	16,900	89,010	112,750	244,047	82,472
ZK2Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T3	4,770	16,890	88,610	112,740	244,055	80,565
ZK2Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T4	4,700	16,840	88,420	112,830	243,913	79,148

Proben-Nr.	Bruch-ein-schnürung	Bruch-dehnung	Höchst-zugkraft	Zugfestig-keit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
ZK2Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T1	62,799	27,685	123430	506,220
ZK2Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T2	66,207	26,671	123695	506,848
ZK2Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T3	66,989	27,232	123573	506,333
ZK2Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T4	67,551	27,607	123307	505,537
Mittelwert	65,886	27,299	123501	506,234
Varianz	4,540	0,214	28499	0,291
Standardabweichung	2,131	0,463	169	0,540

Schweißprobe-Nr.: SE3-D10-F0,25-A0,2-R6

Proben-Nr.	Bruch-lage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
ZK3Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T1	Grund	9,719	9,733	9,726	25,037	25,042	25,040
ZK3Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T2	Grund	9,732	9,751	9,742	25,044	25,053	25,049
ZK3Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T3	Grund	9,750	9,729	9,740	25,039	25,045	25,042
ZK3Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T4	Grund	9,715	9,732	9,724	25,044	25,045	25,045

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer-schnitt	Quer-schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
ZK3Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T1	5,420	17,100	88,130	111,570	243,534	92,682
ZK3Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T2	5,860	17,570	88,750	111,360	244,010	102,960
ZK3Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T3	4,990	17,340	88,470	112,680	243,897	86,527
ZK3Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T4	5,760	17,620	88,480	113,530	243,520	101,491

Proben-Nr.	Bruch-einschnürung	Bruch-dehnung	Höchst-zugkraft	Zugfestig-keit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
ZK3Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T1	61,943	26,597	122526	503,116
ZK3Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T2	57,805	25,476	123173	504,787
ZK3Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T3	64,523	27,365	122970	504,189
ZK3Q-D10-F0,25-A0,2-R6-T4	58,323	28,311	122672	503,745
Mittelwert	60,649	26,937	122835	503,959
Varianz	10,061	1,441	84840	0,498
Standardabweichung	3,172	1,200	291	0,706

Schweißprobe-Nr.: SE1-D10-F0,25-A0,5-R6

Proben-Nr.	Bruch-lage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
ZK1Q-D10-F0,25-A0,5-R6-T1	Grund	9,748	9,760	9,754	25,015	25,008	25,012
ZK1Q-D10-F0,25-A0,5-R6-T2	Grund	9,759	9,763	9,761	25,021	25,010	25,016
ZK1Q-D10-F0,25-A0,5-R6-T3	Grund	9,767	9,766	9,767	25,011	25,011	25,011
ZK1Q-D10-F0,25-A0,5-R6-T4	Grund	9,754	9,763	9,759	25,015	25,011	25,013

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer-schnitt	Quer-schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
ZK1Q-D10-F0,25-A0,5-R6-T1	5,230	16,980	88,950	111,190	243,962	88,805
ZK1Q-D10-F0,25-A0,5-R6-T2	5,230	17,260	88,610	111,820	244,176	90,270
ZK1Q-D10-F0,25-A0,5-R6-T3	5,520	17,050	89,180	111,820	244,270	94,116
ZK1Q-D10-F0,25-A0,5-R6-T4	5,100	17,120	88,900	113,010	244,089	87,312

Proben-Nr.	Bruch-ein-schnürung	Bruch-dehnung	Höchst-zugkraft	Zugfestig-keit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
ZK1Q-D10-F0,25-A0,5-R6-T1	63,599	25,003	123301	505,410
ZK1Q-D10-F0,25-A0,5-R6-T2	63,031	26,193	123497	505,770
ZK1Q-D10-F0,25-A0,5-R6-T3	61,470	25,387	122823	502,817
ZK1Q-D10-F0,25-A0,5-R6-T4	64,229	27,120	123382	505,479
Mittelwert	63,082	25,926	123251	504,869
Varianz	1,394	0,880	87787	1,896
Standardabweichung	1,181	0,938	296	1,377

Schweißprobe-Nr.: SE2-D10-F0,25-A0,5-R6

Proben-Nr.	Bruch-lage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
ZK2Q-D10-F0,25-A0,5-R6-T1	Grund	9,759	9,771	9,765	25,015	25,012	25,014
ZK2Q-D10-F0,25-A0,5-R6-T2	Grund	9,782	9,765	9,774	25,017	25,015	25,016
ZK2Q-D10-F0,25-A0,5-R6-T3	Grund	9,783	9,767	9,775	25,015	25,012	25,014
ZK2Q-D10-F0,25-A0,5-R6-T4	Grund	9,776	9,760	9,768	25,015	25,015	25,015

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer-schnitt	Quer-schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
ZK2Q-D10-F0,25-A0,5-R6-T1	5,500	17,540	88,620	112,530	244,257	96,470
ZK2Q-D10-F0,25-A0,5-R6-T2	5,230	17,050	88,610	111,330	244,494	89,172
ZK2Q-D10-F0,25-A0,5-R6-T3	5,010	17,290	89,150	112,870	244,507	86,623
ZK2Q-D10-F0,25-A0,5-R6-T4	5,210	16,930	89,250	113,580	244,347	88,205

Proben-Nr.	Bruch-ein-schnürung	Bruch-dehnung	Höchst-zugkraft	Zugfestig-keit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
ZK2Q-D10-F0,25-A0,5-R6-T1	60,505	26,980	123587	505,972
ZK2Q-D10-F0,25-A0,5-R6-T2	63,528	25,640	123356	504,536
ZK2Q-D10-F0,25-A0,5-R6-T3	64,572	26,607	124100	507,552
ZK2Q-D10-F0,25-A0,5-R6-T4	63,902	27,261	124012	507,525
Mittelwert	63,127	26,622	123764	506,396
Varianz	3,242	0,500	124064	2,083
Standardabweichung	1,801	0,707	352	1,443

Schweißprobe-Nr.: SE1-D10-F0,25-A0,8-R6

Proben-Nr.	Bruch-lage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Zk1Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T1	Naht	9,729	9,738	9,734	25,000	25,016	25,008
Zk1Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T2	Naht	9,737	9,740	9,739	25,018	25,004	25,011
Zk1Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T3	Naht	9,741	9,747	9,744	25,007	25,007	25,007
Zk1Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T4	Naht	9,744	9,749	9,747	25,002	25,005	25,004

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer-schnitt	Quer-schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Zk1Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T1	9,460	24,640	88,730	94,740	243,415	233,094
Zk1Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T2	9,600	24,660	88,990	94,370	243,570	236,736
Zk1Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T3	9,450	24,510	88,550	94,420	243,668	231,620
Zk1Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T4	9,480	24,740	88,870	92,900	243,697	234,535

Proben-Nr.	Bruch-einschnürung	Bruch-dehnung	Höchst-zugkraft	Zugfestig-keit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
Zk1Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T1	4,240	6,773	109827	451,192
Zk1Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T2	2,806	6,046	107374	440,835
Zk1Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T3	4,945	6,629	109550	449,587
Zk1Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T4	3,759	4,535	92048	377,716
Mittelwert	3,937	5,996	104700	429,832
Varianz	0,806	1,048	72344003	1227,892
Standardabweichung	0,898	1,024	8506	35,041

Schweißprobe-Nr.: SE2-D10-F0,25-A0,8-R6

Proben-Nr.	Bruch-lage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
Zk2Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T1	Naht	9,725	9,712	9,719	25,023	25,020	25,022
Zk2Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T2	Naht	9,736	9,711	9,724	25,031	25,025	25,028
Zk2Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T3	Naht	9,733	9,719	9,726	25,021	25,028	25,025
Zk2Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T4	Naht	9,740	9,722	9,731	25,021	25,025	25,023

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer-schnitt	Quer-schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
Zk2Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T1	9,380	24,430	88,950	95,260	243,171	229,153
Zk2Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T2	9,410	24,490	88,610	94,250	243,360	230,451
Zk2Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T3	9,410	24,520	88,460	93,450	243,388	230,733
Zk2Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T4	9,490	24,670	88,260	92,560	243,499	234,118

Proben-Nr.	Bruch-einschnürung	Bruch-dehnung	Höchst-zugkraft	Zugfestig-keit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
Zk2Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T1	5,765	7,094	111305	457,722
Zk2Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T2	5,304	6,365	108805	447,095
Zk2Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T3	5,200	5,641	107588	442,043
Zk2Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T4	3,852	4,872	99830	409,981
Mittelwert	5,030	5,993	106882	439,210
Varianz	0,677	0,910	24496666	422,405
Standardabweichung	0,823	0,954	4949	20,552

Schweißprobe-Nr.: SE3-D10-F0,25-A0,8-R6

Proben-Nr.	Bruch-lage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
ZK3Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T1	Naht	9,743	9,752	9,748	25,017	25,019	25,018
ZK3Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T2	Naht	9,746	9,745	9,746	25,021	25,026	25,024
ZK3Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T3	Naht	9,751	9,755	9,753	25,030	25,026	25,028
ZK3Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T4	Naht	9,755	9,746	9,751	25,028	25,030	25,029

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer-schnitt	Quer-schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
ZK3Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T1	9,330	24,250	88,540	97,730	243,863	226,253
ZK3Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T2	9,430	24,480	88,420	94,450	243,867	230,846
ZK3Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T3	9,470	24,520	88,670	93,700	244,098	232,204
ZK3Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T4	9,500	24,620	88,990	94,100	244,045	233,890

Proben-Nr.	Bruch-ein-schnürung	Bruch-dehnung	Höchst-zugkraft	Zugfestig-keit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
ZK3Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T1	7,221	10,379	115747	474,640
ZK3Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T2	5,339	6,820	109488	448,967
ZK3Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T3	4,873	5,673	108959	446,374
ZK3Q-D10-F0,25-A0,8-R6-T4	4,161	5,742	103324	423,380
Mittelwert	5,399	7,154	109380	448,340
Varianz	1,711	4,901	25800910	439,634
Standardabweichung	1,308	2,214	5079	20,967

Schweißprobe-Nr.: SE1-D10-F1,00-A0,2-R6

Proben-Nr.	Bruch-lage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
ZK1Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T1	Grund	9,744	9,755	9,750	25,052	25,050	25,051
ZK1Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T2	Grund	9,762	9,757	9,760	25,051	25,057	25,054
ZK1Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T3	Grund	9,768	9,763	9,766	25,052	25,049	25,051
ZK1Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T4	Grund	9,754	9,752	9,753	25,051	25,053	25,052

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer-schnitt	Quer-schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
ZK1Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T1	4,780	17,070	88,560	112,630	244,235	81,595
ZK1Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T2	5,300	17,520	88,630	112,480	244,515	92,856
ZK1Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T3	5,280	17,140	88,250	111,110	244,631	90,499
ZK1Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T4	5,610	17,460	88,480	112,820	244,332	97,951

Proben-Nr.	Bruch-ein-schnürung	Bruch-dehnung	Höchst-zugkraft	Zugfestig-keit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
ZK1Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T1	66,592	27,179	123231	504,560
ZK1Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T2	62,024	26,910	123467	504,948
ZK1Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T3	63,006	25,904	123701	505,664
ZK1Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T4	59,911	27,509	123075	503,720
Mittelwert	62,883	26,875	123369	504,723
Varianz	7,780	0,480	75102	0,656
Standardabweichung	2,789	0,693	274	0,810

Schweißprobe-Nr.: SE2-D10-F1,00-A0,2-R6

Proben-Nr.	Bruch-lage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
ZK2Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T1	Grund	9,774	9,754	9,764	24,901	24,903	24,902
ZK2Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T2	Grund	9,782	9,769	9,776	24,901	24,908	24,905
ZK2Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T3	Grund	9,760	9,786	9,773	24,908	24,910	24,909
ZK2Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T4	Grund	9,770	9,767	9,769	24,909	24,906	24,908

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer-schnitt	Quer-schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
ZK2Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T1	5,630	17,450	88,680	109,760	243,143	98,244
ZK2Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T2	5,710	17,370	88,410	110,350	243,454	99,183
ZK2Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T3	5,240	17,010	88,610	110,760	243,436	89,132
ZK2Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T4	5,010	16,810	88,720	112,110	243,309	84,218

Proben-Nr.	Bruch-ein-schnürung	Bruch-dehnung	Höchst-zugkraft	Zugfestig-keit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
ZK2Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T1	59,594	23,771	123227	506,808
ZK2Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T2	59,260	24,816	123352	506,675
ZK2Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T3	63,386	24,997	122909	504,893
ZK2Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T4	65,386	26,364	122673	504,186
Mittelwert	61,907	24,987	123040	505,641
Varianz	8,882	1,135	94721	1,703
Standardabweichung	2,980	1,065	308	1,305

Schweißprobe-Nr.: SE3-D10-F1,00-A0,2-R6

Proben-Nr.	Bruch-lage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
ZK3Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T1	Grund	9,763	9,761	9,762	24,984	24,982	24,983
ZK3Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T2	Grund	9,776	9,776	9,776	24,983	24,991	24,987
ZK3Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T3	Grund	9,768	9,769	9,769	24,986	24,981	24,984
ZK3Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T4	Grund	9,771	9,770	9,771	24,974	24,975	24,975

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer-schnitt	Quer-schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
ZK3Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T1	5,270	17,310	88,610	112,680	243,884	91,224
ZK3Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T2	5,110	17,610	88,350	111,660	244,273	89,987
ZK3Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T3	5,690	17,380	88,800	112,180	244,051	98,892
ZK3Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T4	5,130	17,220	88,640	113,010	244,013	88,339

Proben-Nr.	Bruch-einschnürung	Bruch-dehnung	Höchst-zugkraft	Zugfestig-keit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
ZK3Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T1	62,595	27,164	123172	505,043
ZK3Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T2	63,161	26,384	124266	508,718
ZK3Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T3	59,479	26,329	124326	509,426
ZK3Q-D10-F1,00-A0,2-R6-T4	63,798	27,493	124260	509,234
Mittelwert	62,258	26,842	124006	508,105
Varianz	3,674	0,334	310024	4,256
Standardabweichung	1,917	0,578	557	2,063

Schweißprobe-Nr.: SE2-D10-F1,00-A0,5-R6

Proben-Nr.	Bruch-lage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
ZK1Q-D10-F1,00-A0,5-R6-T1	Naht	9,765	9,745	9,755	25,033	25,032	25,033
ZK1Q-D10-F1,00-A0,5-R6-T2	Grund	9,765	9,740	9,753	25,038	25,037	25,038
ZK1Q-D10-F1,00-A0,5-R6-T3	Naht	9,770	9,747	9,759	25,038	25,035	25,037
ZK1Q-D10-F1,00-A0,5-R6-T4	Naht	9,772	9,748	9,760	25,030	25,036	25,033

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer-schnitt	Quer-schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
ZK1Q-D10-F1,00-A0,5-R6-T1	9,100	23,780	88,200	99,520	244,192	216,398
ZK1Q-D10-F1,00-A0,5-R6-T2	5,500	17,240	88,940	112,160	244,178	94,820
ZK1Q-D10-F1,00-A0,5-R6-T3	9,010	23,580	88,740	100,940	244,319	212,456
ZK1Q-D10-F1,00-A0,5-R6-T4	9,270	24,020	88,460	97,620	244,322	222,665

Proben-Nr.	Bruch-ein-schnürung	Bruch-dehnung	Höchst-zugkraft	Zugfestig-keit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
ZK1Q-D10-F1,00-A0,5-R6-T1	11,382	12,834	121223	496,425
ZK1Q-D10-F1,00-A0,5-R6-T2	61,168	26,107	123871	507,298
ZK1Q-D10-F1,00-A0,5-R6-T3	13,042	13,748	123130	503,973
ZK1Q-D10-F1,00-A0,5-R6-T4	8,864	10,355	119644	489,698
Mittelwert	23,614	15,761	121967	499,348
Varianz	629,747	49,631	3642550	62,085
Standardabweichung	25,095	7,045	1909	7,879

Schweißprobe-Nr.: SE2-D10-F1,00-A0,5-R6

Proben-Nr.	Bruch-lage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
ZK2Q-D10-F1,00-A0,5-R6-T1	Grund	9,730	9,735	9,733	25,048	25,049	25,049
ZK2Q-D10-F1,00-A0,5-R6-T2	Grund	9,730	9,726	9,728	25,049	25,040	25,045
ZK2Q-D10-F1,00-A0,5-R6-T3	Grund	9,727	9,724	9,726	25,040	25,039	25,040
ZK2Q-D10-F1,00-A0,5-R6-T4	Naht	9,718	9,726	9,722	25,038	25,039	25,039

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer-schnitt	Quer-schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
ZK2Q-D10-F1,00-A0,5-R6-T1	5,360	17,720	88,600	112,320	243,785	94,979
ZK2Q-D10-F1,00-A0,5-R6-T2	5,020	17,130	88,830	111,320	243,633	85,993
ZK2Q-D10-F1,00-A0,5-R6-T3	5,270	16,890	88,840	111,090	243,522	89,010
ZK2Q-D10-F1,00-A0,5-R6-T4	9,260	24,200	88,490	96,930	243,424	224,092

Proben-Nr.	Bruch-einschnürung	Bruch-dehnung	Höchst-zugkraft	Zugfestig-keit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
ZK2Q-D10-F1,00-A0,5-R6-T1	61,040	26,772	123575	506,903
ZK2Q-D10-F1,00-A0,5-R6-T2	64,704	25,318	123546	507,099
ZK2Q-D10-F1,00-A0,5-R6-T3	63,449	25,045	123269	506,193
ZK2Q-D10-F1,00-A0,5-R6-T4	7,942	9,538	116420	478,260
Mittelwert	49,284	21,668	121703	499,614
Varianz	761,930	65,973	12421159	202,815
Standardabweichung	27,603	8,122	3524	14,241

Schweißprobe-Nr.: SE1-D10-F2,00-A0,2-R6

Proben-Nr.	Bruch-lage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
ZK1Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T1	Grund	9,760	9,778	9,769	24,996	24,996	24,996
ZK1Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T2	Grund	9,778	9,781	9,780	25,004	25,005	25,005
ZK1Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T3	Grund	9,781	9,785	9,783	25,000	24,995	24,998
ZK1Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T4	Grund	9,771	9,774	9,773	24,996	24,995	24,996

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer-schnitt	Quer-schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
ZK1Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T1	5,680	17,240	88,610	111,790	244,186	97,923
ZK1Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T2	5,630	17,490	88,740	111,670	244,532	98,469
ZK1Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T3	5,330	17,470	88,810	112,000	244,551	93,115
ZK1Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T4	5,220	17,040	88,680	112,270	244,269	88,949

Proben-Nr.	Bruch-ein-schnürung	Bruch-dehnung	Höchst-zugkraft	Zugfestig-keit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
ZK1Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T1	59,898	26,160	123855	507,216
ZK1Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T2	59,732	25,840	124269	508,192
ZK1Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T3	61,924	26,112	123912	506,693
ZK1Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T4	63,586	26,601	123954	507,450
Mittelwert	61,285	26,178	123998	507,388
Varianz	3,346	0,099	34407	0,388
Standardabweichung	1,829	0,315	185	0,623

Schweißprobe-Nr.: SE2-D10-F2,00-A0,2-R6

Proben-Nr.	Bruch-lage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
ZK2Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T1	Grund	9,763	9,766	9,765	25,007	25,007	25,007
ZK2Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T2	Grund	9,773	9,768	9,771	25,007	25,017	25,012
ZK2Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T3	Grund	9,775	9,775	9,775	25,007	25,003	25,005
ZK2Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T4	Grund	9,772	9,779	9,776	25,003	25,005	25,004

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer-schnitt	Quer-schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
ZK2Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T1	5,070	16,920	88,550	114,670	244,181	85,784
ZK2Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T2	5,340	17,300	88,860	113,480	244,380	92,382
ZK2Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T3	5,400	17,220	88,570	110,620	244,424	92,988
ZK2Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T4	5,080	16,980	88,520	112,150	244,427	86,258

Proben-Nr.	Bruch-ein-schnürung	Bruch-dehnung	Höchst-zugkraft	Zugfestig-keit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
ZK2Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T1	64,868	29,497	123548	505,969
ZK2Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T2	62,197	27,707	123563	505,619
ZK2Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T3	61,956	24,896	123755	506,313
ZK2Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T4	64,710	26,695	124035	507,453
Mittelwert	63,433	27,199	123725	506,339
Varianz	2,466	3,700	51524	0,632
Standardabweichung	1,570	1,924	227	0,795

Schweißprobe-Nr.: SE3-D10-F2,00-A0,2-R6

Proben-Nr.	Bruch-lage	Dicke a [mm]			Breite b [mm]		
		1.	2.	MW	1.	2.	MW
ZK3Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T1	Grund	9,717	9,716	9,717	25,012	25,009	25,011
ZK3Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T2	Grund	9,714	9,714	9,714	25,016	25,010	25,013
ZK3Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T3	Grund	9,723	9,716	9,720	25,005	25,011	25,008
ZK3Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T4	Grund	9,717	9,716	9,717	25,013	25,015	25,014

Proben-Nr.	Dicke	Breite	Länge	Länge	Quer-schnitt	Quer-schnitt
	a _B [mm]	b _B [mm]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	S ₀ [mm ²]	S _u [mm ²]
ZK3Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T1	5,180	17,060	88,650	112,530	243,015	88,371
ZK3Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T2	5,000	17,100	88,530	112,500	242,976	85,500
ZK3Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T3	5,050	16,900	89,300	112,900	243,065	85,345
ZK3Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T4	4,980	17,080	89,030	114,140	243,049	85,058

Proben-Nr.	Bruch-ein-schnürung	Bruch-dehnung	Höchst-zugkraft	Zugfestig-keit
	Z [%]	A [%]	F _m [N]	R _m [N/mm ²]
ZK3Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T1	63,636	26,937	122429	503,793
ZK3Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T2	64,811	27,076	123065	506,490
ZK3Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T3	64,888	26,428	122952	505,839
ZK3Q-D10-F2,00-A0,2-R6-T4	65,004	28,204	122727	504,949
Mittelwert	64,585	27,161	122793	505,268
Varianz	0,407	0,561	78706	1,366
Standardabweichung	0,638	0,749	281	1,169

A11 Ablaufplan der Schliffprobenpräparation

Herstellung von Nital 3% (alkoholische Salpetersäure)

Salpetersäure 65,3% Dichte 1,39 kg/dm³
 Ethanol Dichte 0,79 kg/dm³

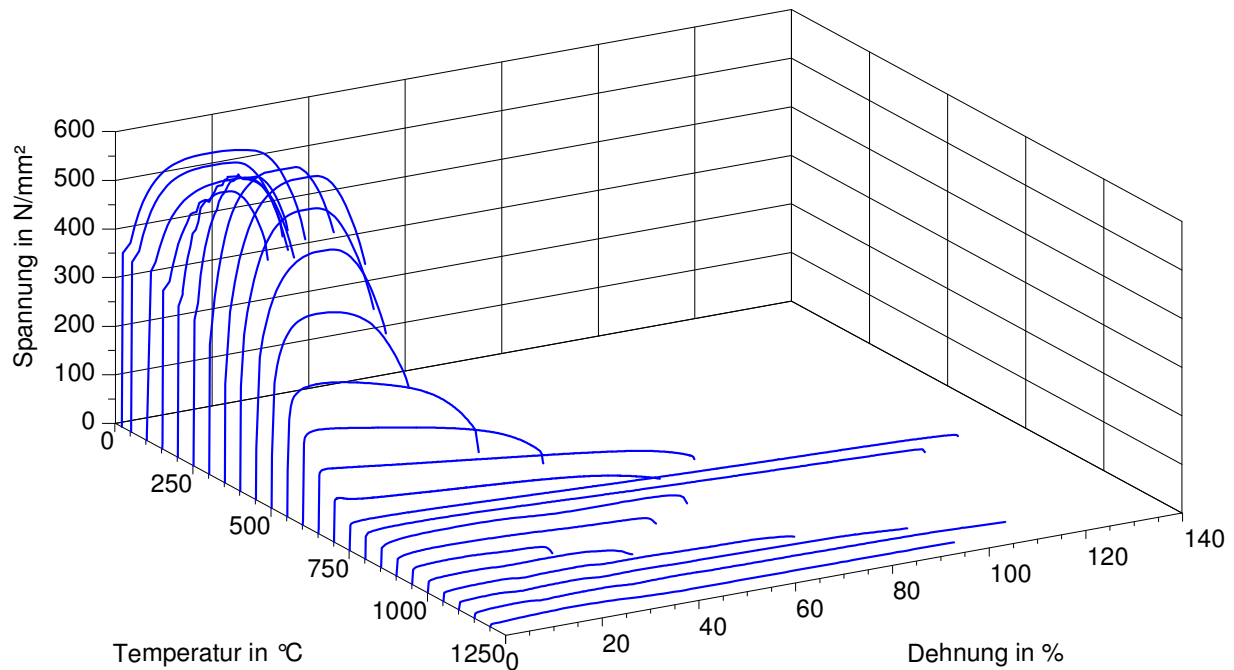
Mischungskreuz

Salpetersäure 65%	↘		↗	Salpetersäure 3 gr	/	1,39 kg/dm ³	=	Salpetersäure 2,16 ml
		Nital 3%						
Ethanol 0%	↗		↘	Ethanol 62 gr	/	0,79 kg/dm ³	=	Ethanol 78,48 ml
				Nital 65 gr				Nital 80,64 ml

Herstellung von Schliffen mit Technovit 4071®

1. Einbetten in 40mm-Form (2 Löffel Pulver, 1 Löffel Lösung)
2. 4 bis 6 Min. bei 45 N pro Probe mit CAMEO DISK Platinum 1, Körnung 120 mit Wasser, Spülen mit Wasser
3. 4 bis 6 Min. bei 45 N pro Probe mit CAMEO DISK Platinum 3, Körnung 600 mit Wasser, Spülen mit Wasser
4. 4 Min. bei 30 N pro Probe mit CAMEO Läppscheibe und Diamantsuspension 9 µm, Spülen mit Wasser und anschließend Reinigen im US-Bad mit Alkohol
5. 4 Min. bei 30 N pro Probe mit Poliertuch orange und Diamantsuspension 6 µm, Spülen mit Alkohol und Reinigen im US-Bad mit Alkohol
6. 3 Min. bei 30 N pro Probe mit Poliertuch orange und Diamantsuspension 1 µm, Spülen mit Alkohol und Reinigen im US-Bad mit Alkohol
7. 1 Min. bei 20 N pro Probe mit Poliertuch rot und Diamantsuspension 1 µm, Spülen mit Alkohol und Reinigen im US-Bad mit Alkohol
8. Ätzen mit Nital 3% ungefähr 1 bis 1,5 Min

A12 Spannungs-Dehnungs-Verläufe für einen Temperaturbereich von 20 bis 1200 °C bei einer Geschwindigkeit V1



20 °C		50 °C		100 °C		150 °C		200 °C	
ϵ [%]	σ [N/mm ²]	ϵ [%]	σ [N/mm ²]	ϵ [%]	σ [N/mm ²]	ϵ [%]	σ [N/mm ²]	ϵ [%]	σ [N/mm ²]
0.17087	343.633	0.17231	329.720	0.16725	334.395	0.15513	307.527	0.14672	302.562
0.18401	356.624	0.18643	356.314	0.17376	345.283	0.16754	324.791	0.20643	320.601
1.81322	375.181	1.65834	368.949	1.82736	362.790	1.44777	341.466	0.96520	333.818
2.67060	407.710	2.48177	400.281	2.67173	392.093	2.06176	370.066	1.48410	378.999
3.54508	433.971	3.30698	425.872	3.52023	416.191	2.67674	392.462	2.02841	407.958
4.41774	455.084	4.13109	446.206	4.35521	435.010	3.30134	415.096	2.59783	428.784
5.29105	471.707	4.95192	462.110	5.20617	450.294	3.91867	432.370	3.03513	455.081
6.15215	484.717	5.77751	474.820	6.04776	462.242	4.53826	444.664	3.69174	461.352
7.02278	495.197	6.60034	484.827	6.89410	471.807	5.15926	456.053	4.22982	477.333
7.89161	503.540	7.42116	492.815	7.75000	479.534	5.77294	472.261	4.80471	495.376
8.76934	510.232	8.24792	499.177	8.59716	485.650	6.39095	474.001	5.34942	512.584
9.63898	515.489	9.07417	504.233	9.43601	490.557	7.01580	474.227	5.83384	517.958
10.50670	519.622	9.89835	508.158	10.28620	494.526	7.63865	492.122	6.44816	514.647
11.37687	522.895	10.71791	511.267	11.13560	497.621	8.25324	494.812	6.99115	524.784
12.25450	525.393	11.54463	513.646	11.97952	500.054	8.87614	496.028	7.54090	531.896
13.12121	527.246	12.37823	515.471	12.82739	501.967	9.49036	494.209	8.05240	542.681
13.99187	528.661	13.19241	516.706	13.66640	503.359	10.11044	497.870	8.60822	543.797
14.86717	529.571	14.01829	517.606	14.52206	504.424	10.73400	502.982	9.17683	543.517
15.73820	530.107	14.85013	518.077	15.36821	505.074	11.34654	504.967	9.65111	554.117
16.60901	530.347	15.67857	518.223	16.22061	505.344	11.97327	505.624	10.23151	553.672

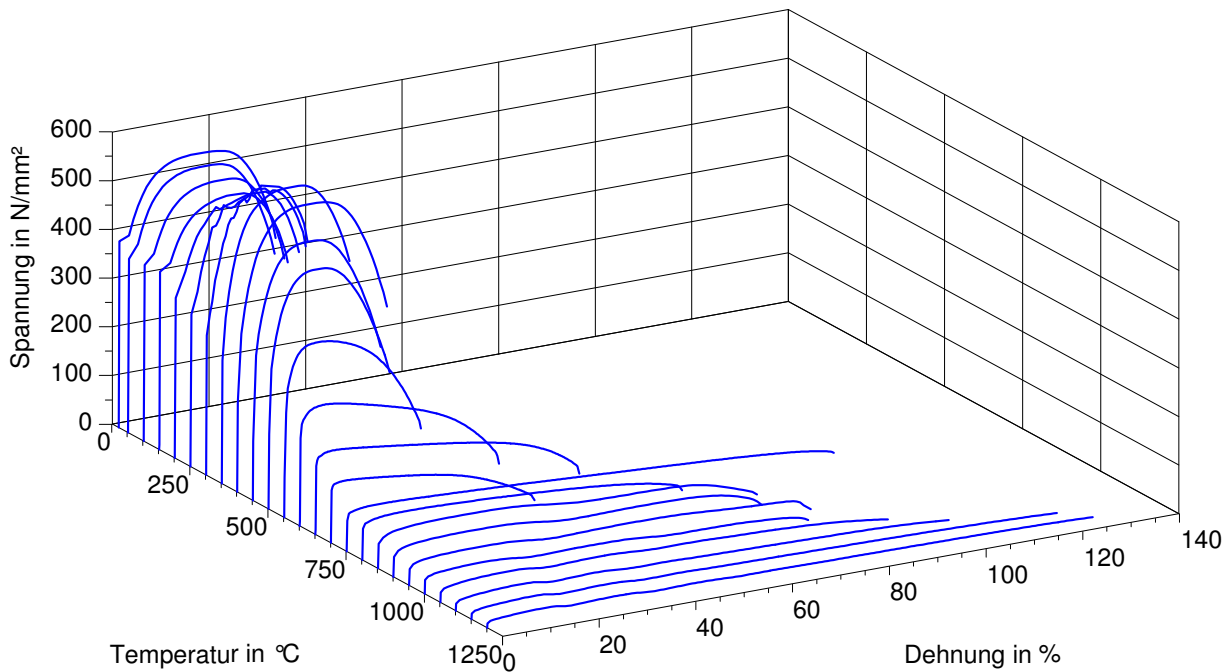
250 °C		300 °C		350 °C		400 °C		450 °C	
ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]
0.17184	298.063	0.14572	258.335	0.11818	210.020	0.11011	188.382	0.07675	121.942
0.26364	329.085	0.38387	300.289	0.35601	268.581	0.38324	275.431	0.35634	238.761
0.94719	333.201	1.10280	361.442	1.07619	349.573	0.78969	320.659	0.76052	290.937
1.43022	388.661	1.84288	410.880	2.04187	408.642	1.45859	365.825	1.46392	332.504
1.83862	414.782	2.57839	451.078	3.00245	453.234	2.13361	400.718	2.15178	362.221
2.37592	445.021	3.32709	484.166	3.96219	486.858	2.80626	429.413	2.85051	386.745
2.87385	463.698	4.06663	510.136	4.93300	513.638	3.46846	453.029	3.55368	406.718
3.35908	484.447	4.80532	530.386	5.89641	534.651	4.14444	473.115	4.24596	422.734
3.74226	493.675	5.55022	546.361	6.85562	550.959	4.81389	489.689	4.94667	435.885
4.33358	510.928	6.29598	559.078	7.81824	563.876	5.48167	503.510	5.64323	446.741
4.82741	517.766	7.03044	568.997	8.78616	573.950	6.16425	515.027	6.34112	455.536
5.27580	533.835	7.77882	576.637	9.73960	581.587	6.83385	524.311	7.04033	463.029
5.82968	545.118	8.51632	583.225	10.70040	587.701	7.49855	531.965	7.73765	469.128
6.23579	548.900	9.26265	589.011	11.67227	592.244	8.16895	538.363	8.42977	474.221
6.70628	555.355	10.00600	593.753	12.62507	595.501	8.84973	543.575	9.13404	478.277
7.10379	563.305	10.74670	597.458	13.59324	597.393	9.51386	547.695	9.81969	481.626
7.60258	570.753	11.48011	600.279	13.82256	597.725	10.18276	550.737	10.52639	484.221
8.24552	571.519	12.22842	602.468	13.82256	597.725	10.86038	552.974	11.22428	486.030
8.75518	574.143	12.96629	603.738	13.82256	597.725	11.53119	554.412	11.91831	487.116
9.25023	583.433	13.71678	604.247	17.36806	598.277	12.21063	554.999	12.62097	487.451

500 °C		550 °C		600 °C		650 °C		700 °C	
ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]
0.07542	116.649	0.07168	93.189	0.10754	93.609	0.11985	83.553	0.13128	70.634
0.36341	226.958	0.34911	184.021	0.44345	179.303	0.37667	126.224	0.35968	87.705
0.58584	257.033	0.41445	199.749	0.47087	179.935	0.45494	127.145	0.39032	87.949
1.09135	290.527	0.75701	225.411	0.50566	180.585	0.53646	127.886	0.43768	88.221
1.58798	310.273	1.09974	238.259	0.67241	183.333	0.60195	128.351	0.47004	88.346
2.10149	326.462	1.43168	244.189	0.82623	184.817	0.68695	128.734	0.50266	88.462
2.60438	338.924	1.78353	248.530	0.98805	185.894	0.77164	129.089	0.55342	88.564
3.10713	348.855	2.12178	251.486	1.14880	186.966	0.84240	129.190	0.59349	88.618
3.62307	356.929	2.46872	253.863	1.29593	187.724	0.93033	129.308	0.62677	88.666
4.12110	363.018	2.80382	255.600	1.46256	188.301	1.01800	129.427	0.67208	88.787
4.62786	367.990	3.15133	257.189	1.61538	188.812	1.08837	129.528	0.70673	88.813
5.12972	371.877	3.48780	258.253	1.77954	189.209	1.17605	129.641	0.74145	88.831
5.64695	374.971	3.83560	259.097	1.94299	189.448	1.24743	129.691	0.77679	88.849
6.14786	377.390	4.17025	259.842	2.09958	189.786	1.34122	129.836	0.82900	88.853
6.65805	379.328	4.51369	260.369	2.25416	189.912	1.41120	129.836	0.85605	88.810
7.16253	380.796	4.86164	260.754	2.40735	190.048	1.49622	129.848	0.89079	88.771
7.66583	381.805	5.20796	261.120	2.57661	190.220	1.57978	129.912	0.94305	88.720
8.17366	382.425	5.54096	261.244	2.73689	190.283	1.64940	129.836	0.98187	88.668
8.67617	382.805	5.87559	261.320	2.88501	190.377	2.24848	129.537	1.01613	88.629
9.19196	382.987	6.23553	261.454	3.03982	190.400	2.31935	129.542	0.86464	88.885

750 °C		800 °C		850 °C		900 °C		950 °C	
ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]
0.08577	45.045	0.09521	37.420	0.18372	34.741	0.23460	30.948	0.13448	25.350
0.31289	54.864	0.32899	51.231	0.42989	42.998	0.47261	36.852	0.37424	31.895
0.35526	55.112	0.60452	52.905	0.96730	45.771	0.68264	37.676	0.61836	32.926
0.61803	55.936	1.08528	54.044	1.73844	48.175	1.09632	38.648	1.04318	34.014
0.86158	56.391	1.56910	54.931	2.50488	49.738	1.50684	39.540	1.47932	34.591
1.12223	56.764	2.05136	55.450	3.27705	50.857	1.92363	40.311	1.90564	35.022
1.37277	56.982	2.53486	55.893	4.05044	51.758	2.32964	40.924	2.33061	35.418
1.63088	57.133	3.02099	56.204	4.82369	52.446	2.74394	41.451	2.77097	35.769
1.89465	57.324	3.50394	56.479	5.59391	53.010	3.15077	41.917	3.19318	36.088
2.14909	57.430	3.99057	56.718	6.36232	53.529	3.56317	42.316	3.63389	36.344
2.40013	57.572	4.47788	56.903	7.13592	53.893	3.98814	42.702	4.05547	36.605
2.65587	57.661	4.95200	57.048	7.90632	54.262	4.39909	43.035	4.49781	36.835
2.91115	57.772	5.44101	57.178	8.67550	54.524	4.81328	43.323	4.92637	37.019
3.17653	57.839	5.92819	57.273	9.44375	54.737	5.21690	43.527	5.35754	37.159
3.41853	57.897	6.41108	57.350	10.21451	54.928	5.63951	43.714	5.78894	37.285
3.67500	57.945	6.88777	57.404	10.98657	55.088	6.05043	43.842	6.21015	37.370
3.94261	57.963	7.38222	57.440	11.74558	55.203	6.45819	43.989	6.64297	37.442
4.19352	57.968	7.86080	57.467	12.51867	55.305	6.86956	44.108	7.07956	37.469
4.45347	57.959	8.34159	57.476	13.29650	55.341	7.28694	44.166	7.51155	37.532
4.71544	57.985	8.83598	57.508	14.06982	55.421	7.70613	44.206	7.94634	37.564

1000 °C		1050 °C		1100 °C		1150 °C		1200 °C	
ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]
0.12612	18.967	0.10517	14.656	0.18202	12.858	0.06178	8.201	0.03119	3.597
0.36447	24.332	0.33767	17.834	0.44278	16.177	0.28286	10.562	0.28675	4.558
0.66659	25.243	0.72864	18.724	0.66017	16.426	0.56802	11.227	1.10502	5.196
1.15172	26.030	1.30097	19.534	1.05564	16.804	1.03182	11.875	1.92377	5.668
1.62708	26.591	1.85477	20.080	1.46415	17.085	1.51086	12.365	2.73865	6.071
2.09547	27.012	2.42211	20.568	1.85852	17.338	1.96728	12.788	3.56448	6.442
2.57924	27.343	2.98325	20.925	2.26729	17.561	2.44499	13.239	4.38819	6.793
3.05481	27.635	3.54208	21.251	2.66734	17.752	2.91268	13.596	5.21174	7.135
3.51907	27.900	4.11367	21.554	3.07394	17.961	3.37949	13.859	6.03663	7.470
4.00060	28.117	4.67696	21.779	3.46355	18.121	3.84927	14.132	6.85224	7.781
4.48242	28.307	5.24638	21.999	3.88126	18.259	4.31573	14.364	7.67140	8.095
4.94863	28.471	5.81004	22.175	4.27257	18.410	4.78246	14.524	8.49838	8.391
5.43423	28.599	6.37341	22.338	4.68026	18.539	5.24773	14.716	9.32051	8.700
5.90655	28.741	6.93800	22.457	5.07730	18.695	5.71743	14.859	10.14470	8.993
6.38584	28.838	7.49036	22.567	5.47982	18.797	6.17573	14.979	10.97198	9.283
6.85694	28.940	8.05436	22.651	5.88717	18.882	6.64952	15.153	11.79513	9.563
7.33226	28.993	8.62499	22.721	6.27772	18.962	7.12050	15.256	12.60858	9.821
7.80751	29.050	9.18146	22.796	6.69356	19.047	7.58006	15.336	13.43532	10.064
8.27635	29.050	9.75204	22.831	7.09380	19.109	8.04829	15.443	14.25628	10.232
8.76590	29.090	10.31907	22.902	7.50461	19.167	8.51902	15.457	15.08333	10.296

A13 Spannungs-Dehnungs-Verläufe für einen Temperaturbereich von 20 bis 1200 °C bei einer Geschwindigkeit V2



20 °C		50 °C		100 °C		150 °C		200 °C	
ϵ [%]	σ [N/mm ²]	ϵ [%]	σ [N/mm ²]	ϵ [%]	σ [N/mm ²]	ϵ [%]	σ [N/mm ²]	ϵ [%]	σ [N/mm ²]
0.17450	351.941	0.17257	341.785	0.17062	340.660	0.15642	329.063	0.14931	300.305
0.20329	385.286	0.20013	357.639	0.18759	366.506	0.21447	362.461	0.18631	327.547
2.18063	390.940	2.05169	383.205	2.17326	381.178	2.26499	379.542	2.14001	379.055
2.99626	419.795	2.77864	408.860	2.93935	405.245	2.99695	399.795	2.93589	404.030
3.80858	443.212	3.51206	430.468	3.70727	426.117	3.72037	418.348	3.73312	427.581
4.61782	462.165	4.25546	448.391	4.49000	443.075	4.45580	433.488	4.54259	446.885
5.43963	477.693	4.99471	462.803	5.26939	456.626	5.18527	445.726	5.33466	459.831
6.25689	490.123	5.72773	474.446	6.04447	467.365	5.92459	455.722	6.14637	469.162
7.06899	499.993	6.46864	484.130	6.81242	476.031	6.65511	463.828	6.94627	480.746
7.89092	508.026	7.20240	491.853	7.58773	483.182	7.37631	470.374	7.73492	490.575
8.70454	514.406	7.94253	498.256	8.37168	488.991	8.11972	476.000	8.54762	500.728
9.52547	519.572	8.67394	503.300	9.14484	493.636	8.85254	480.509	9.34592	494.491
10.33610	523.608	9.41001	507.467	9.90652	497.335	9.58883	484.336	10.15422	497.549
11.15384	526.769	10.15254	510.738	10.69152	500.363	10.31275	487.403	10.94233	500.570
11.97728	529.190	10.88194	513.362	11.46444	502.672	11.04024	489.971	11.74513	503.607
12.78888	530.966	11.61678	515.345	12.24146	504.517	11.77078	492.121	12.54932	506.332
13.60560	532.210	12.35567	516.857	13.00641	505.792	12.50504	493.846	13.35561	508.676
14.42823	532.963	13.09958	517.877	13.79297	506.742	13.24355	495.150	14.15841	511.118
15.30897	533.377	13.83010	518.483	14.56687	507.258	13.96834	496.061	14.94758	513.121
15.68810	533.436	14.58216	518.786	15.34507	507.464	14.71868	496.418	15.76469	514.253

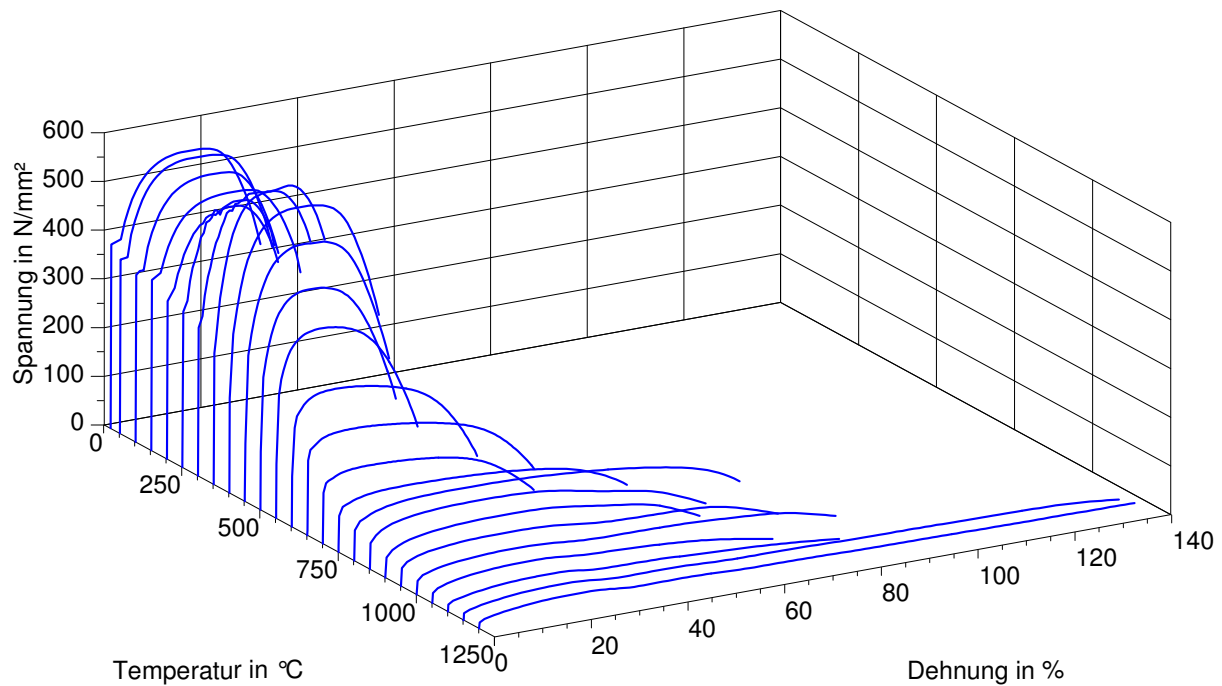
250 °C		300 °C		350 °C		400 °C		450 °C	
ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]
0.14621	298.990	0.12935	281.515	0.13015	245.159	0.10272	188.147	0.08989	165.638
0.37443	329.849	0.35285	308.572	0.36487	285.267	0.40843	282.927	0.35060	245.528
1.45383	356.141	0.80429	329.988	0.85784	339.018	0.83740	323.670	0.64574	297.033
2.18378	395.871	1.30440	353.885	1.58329	392.020	1.57990	374.202	1.21573	339.048
2.96744	428.300	1.86949	396.469	2.29796	433.421	2.32263	414.323	1.78857	371.033
3.76071	453.253	2.44920	420.770	3.01333	466.219	3.07054	446.754	2.36280	397.335
4.49038	483.373	2.99650	444.385	3.72759	491.930	3.81164	472.265	2.95184	419.457
5.30565	485.381	3.50229	469.144	4.45245	512.248	4.56272	492.004	3.52615	437.298
6.04812	499.561	4.03042	483.279	5.16837	528.045	5.30072	507.403	4.09683	452.189
6.85534	525.014	4.61495	505.696	5.88937	540.140	6.04882	520.375	4.67871	464.741
7.60285	518.676	5.19028	517.541	6.60927	549.687	6.79253	530.877	5.25514	475.151
8.39143	515.942	5.71294	518.022	7.32405	557.271	7.53059	539.355	5.82599	483.598
9.16676	518.151	6.27898	529.745	8.04471	563.770	8.27796	546.198	6.40453	490.716
9.94262	525.159	6.83973	545.433	8.75674	568.998	9.01597	551.785	6.97530	496.414
10.71982	528.325	7.35758	549.428	9.47578	573.241	9.76280	556.118	7.55334	501.082
11.48173	531.080	7.92728	555.098	10.19987	576.747	10.50137	559.318	8.13804	504.771
12.25604	535.573	8.43545	544.782	10.91551	579.271	11.24450	561.839	8.71404	507.472
12.98109	545.532	8.97765	551.282	11.63561	581.227	11.99701	563.370	9.27985	509.399
13.79030	543.507	9.57017	566.427	12.34669	582.400	12.73811	564.314	9.86760	510.705
14.52962	547.286	10.13336	568.254	13.08147	582.937	13.48529	564.667	10.44734	511.188

500 °C		550 °C		600 °C		650 °C		700 °C	
ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]
0.08015	134.551	0.09830	131.533	0.13345	143.003	0.14099	121.570	0.13217	93.399
0.36346	258.746	0.37280	208.085	0.38955	205.650	0.37250	151.873	0.38787	116.406
0.59323	286.869	0.41806	214.492	0.44590	207.972	0.46694	154.145	0.41971	116.909
1.09806	324.828	0.76444	263.857	0.74418	216.586	0.56716	155.888	0.46960	117.534
1.59626	351.396	1.11373	282.301	1.02048	220.283	0.76769	158.143	0.62295	119.140
2.10887	374.972	1.47241	294.813	1.30759	224.252	0.96846	158.981	0.80020	119.884
2.60855	394.030	1.83186	306.605	1.60914	228.265	1.17897	159.820	0.95003	120.187
3.12033	410.250	2.18839	315.755	1.88423	231.019	1.38513	160.895	1.11939	120.566
3.61638	423.242	2.53775	323.006	2.18282	233.226	1.58585	162.209	1.27430	120.870
4.12260	434.250	2.89564	328.843	2.46668	234.953	1.79039	163.233	1.44783	121.211
4.62303	443.346	3.26036	333.590	2.75421	236.298	1.97984	163.880	1.60201	121.514
5.13226	450.976	3.61501	337.217	3.04452	237.351	2.19002	164.462	1.77369	121.893
5.63525	457.048	3.95769	340.049	3.33134	237.777	2.40075	164.976	1.92760	122.163
6.14416	462.167	4.32106	342.406	3.62441	238.492	2.59384	165.338	2.10085	122.450
6.64529	466.076	4.67287	344.049	3.91884	239.065	2.80812	165.611	2.25622	122.634
7.15233	469.252	5.02763	345.332	4.19566	239.411	3.00466	165.772	2.43412	122.720
7.64939	471.562	5.38552	346.255	4.49272	239.744	3.22115	165.906	2.59148	122.814
8.16951	473.206	5.74673	346.833	4.77037	239.975	3.41781	166.044	2.75028	122.850
8.66368	474.046	6.09177	347.237	5.06876	240.153	3.61599	166.097	2.90993	122.850
9.17981	474.399	6.45723	347.397	5.36788	240.229	3.83360	166.173	3.08774	122.921

750 °C		800 °C		850 °C		900 °C		950 °C	
ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]
0.09246	53.383	0.09713	45.117	0.11417	35.038	0.09907	29.835	0.11117	23.267
0.34082	75.783	0.37645	71.326	0.37969	55.786	0.37223	47.085	0.38174	38.305
0.45610	77.145	0.63651	73.577	1.12138	61.484	0.96307	51.596	0.86891	41.757
0.79766	78.896	1.13367	75.364	2.08591	66.714	1.80718	55.559	1.59189	44.225
1.15113	79.799	1.62992	77.032	3.06058	69.797	2.64274	58.024	2.31967	46.259
1.50585	80.703	2.14168	78.547	4.02740	71.744	3.49377	59.702	3.02738	47.577
1.85763	81.599	2.64118	79.675	4.98293	73.084	4.31877	60.901	3.75709	48.598
2.21059	82.384	3.14554	80.540	5.96358	74.175	5.16263	61.902	4.47498	49.355
2.57072	82.929	3.63412	81.221	6.91686	75.031	6.01204	62.669	5.21046	50.009
2.93138	83.422	4.14323	81.796	7.89390	75.732	6.84327	63.338	5.92892	50.562
3.27927	83.732	4.65047	82.358	8.86001	76.278	7.69463	63.895	6.65071	50.999
3.62502	84.065	5.14498	82.728	9.82509	76.788	8.52931	64.370	7.37237	51.389
3.97454	84.300	5.64113	83.036	10.80025	77.143	9.36758	64.747	8.09269	51.751
4.33982	84.579	6.15686	83.303	11.75664	77.476	10.20680	65.075	8.81912	52.003
4.69393	84.686	6.65670	83.490	12.72092	77.702	11.04744	65.353	9.52950	52.211
5.04268	84.894	7.15920	83.615	13.69513	77.870	11.88788	65.605	10.25585	52.419
5.39980	84.930	7.66008	83.758	14.65871	78.017	12.73502	65.757	10.98585	52.569
5.75098	85.076	8.16421	83.838	15.63034	78.132	13.58076	65.914	11.70196	52.666
6.09085	85.072	8.66926	83.896	16.59579	78.137	14.41482	65.995	12.42019	52.737
6.46200	85.187	9.17475	83.945	17.57424	78.181	15.26639	66.072	13.15588	52.804

1000 °C		1050 °C		1100 °C		1150 °C		1200 °C	
ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]
0.07878	21.560	0.07015	16.079	0.07408	12.619	0.05394	9.055	0.03626	6.743
0.33018	32.015	0.30661	24.418	0.30880	18.263	0.28331	14.705	0.26657	11.720
0.74573	34.487	0.78852	27.092	0.77901	20.505	0.70874	16.497	0.64131	12.971
1.38836	36.193	1.49160	28.971	1.49283	21.976	1.36018	17.664	1.23163	13.881
2.03941	37.846	2.20972	30.583	2.20330	23.340	2.00107	18.695	1.84592	14.535
2.67344	38.855	2.91904	31.761	2.91391	24.382	2.65374	19.545	2.43796	15.208
3.33174	39.613	3.62828	32.743	3.62182	25.242	3.30107	20.267	3.04435	15.785
3.98264	40.183	4.32125	33.565	4.32534	25.999	3.94593	20.879	3.64720	16.287
4.61694	40.730	5.04512	34.327	5.04196	26.687	4.60506	21.430	4.24670	16.737
5.27475	41.219	5.73713	34.963	5.74011	27.281	5.24283	21.923	4.83001	17.111
5.91692	41.618	6.46182	35.547	6.45034	27.851	5.89717	22.363	5.44482	17.468
6.55688	41.999	7.17049	36.057	7.15755	28.381	6.54958	22.764	6.04038	17.789
7.19837	42.322	7.87473	36.561	7.86788	28.825	7.20022	23.130	6.63484	18.084
7.86271	42.564	8.58417	36.968	8.57840	29.224	7.85190	23.451	7.23539	18.313
8.50811	42.793	9.29274	37.347	9.29232	29.554	8.48200	23.764	7.84376	18.573
9.13833	42.972	10.00181	37.688	10.00021	29.899	9.13817	23.993	8.44115	18.776
9.78508	43.152	10.69739	37.973	10.69664	30.170	9.79066	24.226	9.04005	18.952
10.43849	43.255	11.41189	38.221	11.40623	30.329	10.44457	24.429	9.63972	19.111
11.08100	43.291	12.12009	38.361	12.09582	30.492	11.08954	24.565	10.24773	19.216
11.74213	43.322	12.83697	38.426	12.09582	30.492	11.74535	24.631	10.84807	19.269

A14 Spannungs-Dehnungs-Verläufe für einen Temperaturbereich von 20 bis 1200 °C bei einer Geschwindigkeit V3



20 °C		50 °C		100 °C		150 °C		200 °C	
ϵ [%]	σ [N/mm ²]	ϵ [%]	σ [N/mm ²]	ϵ [%]	σ [N/mm ²]	ϵ [%]	σ [N/mm ²]	ϵ [%]	σ [N/mm ²]
0.17069	349.472	0.16901	339.017	0.14270	338.450	0.15611	339.566	0.14424	306.702
0.22324	375.468	0.24355	364.653	0.21566	357.512	0.25334	352.658	0.20934	331.433
2.13334	384.210	1.60113	365.586	1.73253	358.251	1.93102	360.808	1.62850	347.895
2.90981	418.388	2.36423	405.669	2.52012	395.666	2.72733	388.459	2.28074	375.865
3.68852	442.333	3.13479	432.560	3.30162	421.271	3.55440	412.471	2.92917	393.282
4.46301	462.065	3.89886	454.338	4.09356	441.948	4.36923	431.176	3.59243	412.729
5.24837	478.277	4.66506	472.046	4.89054	458.731	5.18104	446.023	4.24681	426.624
6.02674	491.369	5.42978	486.328	5.68743	472.242	5.98571	457.773	4.89480	439.301
6.80503	502.090	6.19994	497.861	6.46570	482.936	6.81404	467.457	5.55052	452.138
7.58399	510.848	6.94920	507.098	7.27137	491.898	7.62032	474.963	6.20420	459.742
8.34639	517.867	7.73520	514.909	8.06495	499.016	8.43737	481.118	6.84180	467.374
9.13453	523.775	8.49603	521.017	8.85844	504.747	9.25313	486.077	7.50456	470.389
9.91283	528.445	9.24819	525.811	9.64282	509.309	10.05758	489.957	8.15459	480.156
10.70408	532.228	10.01107	529.724	10.43912	512.978	10.87418	493.081	8.80957	483.704
11.46957	535.095	10.78261	532.765	11.20976	515.748	11.69762	495.566	9.48111	485.208
12.27087	537.390	11.55615	535.101	12.01732	517.973	12.48779	497.344	10.12318	482.737
13.03485	539.007	12.32972	536.801	12.82407	519.562	13.31151	498.761	10.78650	488.619
13.83055	540.134	13.09733	537.948	13.58743	520.595	14.12848	499.748	11.43234	491.902
14.57756	540.764	13.85731	538.567	14.38040	521.195	14.93704	500.290	12.08029	493.586
15.39209	541.005	14.64414	538.828	15.20203	521.408	15.77394	500.556	12.76200	494.131

250 °C		300 °C		350 °C		400 °C		450 °C	
ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]
0.14817	292.778	0.13415	284.274	0.11383	230.369	0.10489	199.883	0.09781	143.407
0.38345	326.705	0.36675	320.023	0.34453	287.182	0.34615	259.326	0.39738	252.535
1.03478	340.315	0.88926	326.168	0.47585	297.167	0.84650	324.660	0.72688	298.031
1.59479	380.048	1.40018	367.422	1.34422	380.252	1.59673	375.046	1.38246	340.732
2.13499	406.097	2.01591	405.050	2.22597	434.971	2.33488	414.652	2.03749	374.534
2.72591	423.775	2.57370	423.759	3.11908	476.956	3.08578	446.516	2.69438	401.461
3.28733	443.073	3.12829	450.167	3.99121	507.507	3.83019	470.866	3.34372	422.793
3.85212	465.411	3.70050	472.237	4.88916	530.207	4.57489	489.658	3.98739	440.010
4.40567	473.352	4.26510	482.992	5.76869	546.723	5.30779	505.032	4.64131	454.369
4.96498	494.593	4.83995	501.259	6.63034	558.681	6.07153	518.086	5.30443	466.270
5.53371	496.568	5.39202	513.290	7.51916	568.071	6.80513	528.269	5.96175	475.741
6.10414	502.056	5.94850	528.982	8.40097	574.265	7.54065	536.576	6.59603	483.284
6.65654	516.040	6.55627	533.184	9.30119	576.838	8.29995	543.304	7.24824	489.518
7.23212	514.827	7.12979	531.842	10.10370	580.007	9.04612	548.517	7.91430	494.563
7.79559	505.015	7.68537	544.634	10.10370	580.007	9.76791	552.551	8.55894	498.458
8.34476	517.447	8.26276	544.486	10.10370	580.007	10.52705	555.685	9.20599	501.415
8.91518	520.369	8.82230	548.268	12.82973	581.753	11.28609	557.995	9.88280	503.777
9.48440	522.066	9.36262	549.284	13.71297	583.459	12.00616	559.415	10.52301	505.265
10.05639	525.154	9.96671	555.483	14.58327	584.720	12.75664	560.138	11.18972	506.216
10.62706	526.740	10.53831	560.058	15.48237	585.549	13.41553	560.369	11.84558	506.585

500 °C		550 °C		600 °C		650 °C		700 °C	
ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]
0.08239	146.168	0.09595	142.355	0.08569	103.263	0.13992	125.836	0.11658	100.160
0.35622	238.182	0.36616	223.376	0.34999	177.385	0.38607	165.934	0.34198	116.645
0.60404	271.146	0.57551	251.782	0.58221	202.329	3.12584	193.049	3.04305	135.795
1.15945	307.578	1.05640	282.912	1.07389	224.551	1.12839	178.080	1.13275	126.669
1.69400	333.718	1.54998	300.813	1.57220	231.798	1.61272	182.252	1.62826	129.290
2.23737	354.857	2.04424	317.214	2.05033	238.434	2.07543	186.057	2.11831	131.350
2.78414	371.898	2.54089	329.652	2.55221	245.594	2.56597	189.920	2.62501	133.872
3.33659	385.738	3.02412	339.228	3.04460	250.726	3.04061	192.679	3.12550	136.138
3.86918	396.513	3.51542	346.860	3.54384	254.678	3.51802	194.807	3.63449	137.915
4.40727	405.336	4.01002	352.955	4.04599	257.750	3.98246	196.457	4.11694	139.198
4.95786	412.535	4.51301	357.941	4.53410	260.076	4.46377	197.792	4.61727	140.279
5.51048	418.320	4.99186	361.741	5.01603	261.910	4.93262	198.883	5.13148	141.126
6.05525	422.945	5.48122	364.870	5.50864	263.334	5.40747	199.717	5.62948	141.843
6.58550	426.395	5.97861	367.313	6.00659	264.449	5.88260	200.415	6.12925	142.453
7.14567	429.275	6.47757	369.234	6.50487	265.320	6.35547	200.947	6.60342	142.822
7.67874	431.358	6.94711	370.595	7.00066	265.980	6.85057	201.371	7.12563	143.161
8.20872	432.796	7.46637	371.786	7.48987	266.468	7.30871	201.660	7.61416	143.380
8.76191	433.811	7.94919	372.552	7.97012	266.761	7.78459	201.863	8.12062	143.570
9.30632	434.374	8.42043	372.975	8.46949	266.916	8.27723	202.026	8.61487	143.686
9.87202	434.523	8.94227	373.219	8.98701	267.005	8.75642	202.061	9.12505	143.775

750 °C		800 °C		850 °C		900 °C		950 °C	
ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]
0.08816	60.080	0.08036	44.148	0.09886	32.805	0.17044	30.851	0.12538	26.425
0.33705	85.273	0.32772	69.352	0.37896	58.420	0.45739	46.096	0.39348	41.282
0.85437	91.831	1.21693	78.706	1.30342	66.817	1.43123	54.045	1.26391	47.377
1.59994	95.168	2.32759	83.855	2.42582	75.484	2.63623	60.135	2.35542	51.947
2.31762	97.623	3.43787	89.503	3.55064	80.979	3.81978	65.409	3.45052	55.889
3.06824	100.785	4.53893	93.637	4.69122	84.945	5.01583	69.162	4.54502	58.664
3.81550	103.067	5.63271	96.768	5.80023	87.934	6.21872	72.014	5.64438	60.862
4.55823	104.920	6.74413	99.270	6.93638	90.374	7.42180	74.334	6.73439	62.598
5.28858	106.419	7.83453	101.257	8.06813	92.388	8.60906	76.184	7.82111	64.091
6.03483	107.626	8.96229	102.867	9.20184	94.042	9.80290	77.798	8.91238	65.329
6.78359	108.668	10.04734	104.163	10.31452	95.461	10.98477	79.169	10.01650	66.439
7.52720	109.498	11.16856	105.271	11.46192	96.690	12.21044	80.349	11.09156	67.372
8.25576	110.157	12.24995	106.118	12.56571	97.679	13.39617	81.356	12.19174	68.201
8.99094	110.706	13.35036	106.819	13.72461	98.544	14.56673	82.203	13.27633	68.892
9.73050	111.116	14.46609	107.374	14.82019	99.214	15.79545	82.917	14.37481	69.478
10.46948	111.424	15.55188	107.769	15.96606	99.728	16.99218	83.543	15.48496	69.936
11.20109	111.711	16.68117	108.088	17.11381	100.163	18.15751	83.982	16.55636	70.311
11.96365	111.868	17.76490	108.327	18.21847	100.447	19.36515	84.359	17.62723	70.588
12.67715	111.988	18.88880	108.479	19.36406	100.620	20.57869	84.567	18.74413	70.733
13.45375	112.047	20.00714	108.527	20.50272	100.691	21.78501	84.705	19.85904	70.769

1000 °C		1050 °C		1100 °C		1150 °C		1200 °C	
ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]	ε [%]	σ [N/mm ²]
0.12397	20.456	0.08792	13.330	0.06382	8.304	0.06951	8.912	0.06983	8.054
0.40168	31.857	0.35966	23.506	0.32537	16.546	0.32037	15.664	0.33615	14.679
1.22364	37.905	1.11935	28.504	1.09741	20.349	1.30307	19.291	1.10597	17.583
2.25807	41.017	2.08358	31.760	2.10583	22.485	2.47593	21.771	2.11969	19.779
3.31982	44.056	3.06814	34.914	3.10873	24.934	3.67877	24.305	3.12191	21.876
4.36103	46.572	4.04597	37.267	4.11127	26.992	4.86279	26.409	4.12302	23.722
5.40416	48.540	5.03244	39.180	5.12023	28.789	6.05396	28.206	5.12503	25.305
6.46621	50.210	6.00442	40.825	6.11543	30.284	7.22746	29.718	6.11811	26.729
7.51047	51.591	6.97344	42.263	7.11320	31.641	8.40404	31.112	7.11931	27.989
8.55877	52.811	7.96879	43.576	8.12282	32.834	9.59536	32.347	8.12798	29.125
9.59198	53.880	8.92218	44.696	9.11820	33.934	10.78124	33.443	9.12481	30.153
10.66077	54.842	9.90394	45.731	10.11861	34.928	11.98090	34.407	10.13162	31.053
11.69084	55.662	10.87791	46.645	11.11512	35.820	13.14250	35.267	11.12816	31.896
12.73968	56.374	11.87013	47.465	12.13093	36.640	14.33391	36.009	12.14324	32.683
13.80370	56.998	12.83915	48.178	13.12679	37.363	15.51203	36.620	13.14325	33.354
14.83990	57.497	13.81447	48.805	14.13375	38.007	16.71817	37.063	14.15664	33.935
15.88028	57.915	14.79576	49.325	15.15038	38.548	17.87066	37.281	15.17018	34.481
16.92324	58.218	15.77806	49.750	16.13109	38.987	17.95967	37.285	16.15181	34.916
17.97233	58.370	16.76445	50.024	17.11874	39.293	17.95967	37.285	17.14148	35.226
19.06472	58.419	17.75311	50.145	18.16019	39.444	17.95967	37.285	18.18563	35.398

A15 Verlauf des E- und G-Moduls über die Temperatur

Temperatur [°C]	E-Modul V1 [N/mm ²]	E-Modul V1 [N/mm ²]	E-Modul V1 [N/mm ²]	dyn. E-Modul [N/mm ²]	dyn. G-Modul [N/mm ²]
20	201109	201685	204745	212000	83000
50	191348	198053	200588	211000	82000
100	199941	199666	237174	208000	81000
150	198234	210374	217523	205000	80000
200	206215	201132	212630	202000	79000
250	173457	204491	197599	198000	77000
300	177276	217633	211913	194000	75000
350	177705	188371	202371	189000	74000
400	171079	183162	190570	185000	72000
450	158877	184268	146613	180000	70000
500	154668	167881	177418	175000	68000
550	130001	133803	148357	170000	66000
600	87042	107162	120509	165000	63000
650	69716	86226	89934	162000	60000
700	53804	70666	85913	159000	57000
750	52516	57735	68151	157000	51000
800	39302	46452	54939	153000	44000
850	18910	30689	33183	144000	
900	13191	30116	18101	133000	
950	18851	20930	21076		
1000	15039	27366	16501		
1050	13935	22921	15162		
1100	7064	17034	13012		
1150	13275	16786	12821		
1200	11532	18595	11532		

A16 Verlauf der Querkontraktionszahl (Poisson-Zahl) über die Temperatur

Temperatur [°C]	Querkon- traktionszahl [---]	Temperatur [°C]	Querkon- traktionszahl [---]
20	0,277	450	0,286
50	0,287	500	0,287
100	0,284	550	0,288
150	0,281	600	0,310
200	0,278	650	0,350
250	0,286	700	0,395
300	0,293	750	0,539
350	0,277	800	0,739
400	0,285		

A17 Verlauf der Dichte über die Temperatur

Temperatur [°C]	Dichte [kg/m³]	Temperatur [°C]	Dichte [kg/m³]
20	7,837	550	7,658
50	7,828	600	7,639
100	7,813	650	7,620
150	7,798	700	7,602
200	7,782	750	7,600
250	7,776	800	7,612
300	7,748	850	7,615
350	7,731	900	7,590
400	7,713	950	7,564
450	7,695	1000	7,541
500	7,677	1050	7,514

A18 Verlauf des Wärmeausdehnungskoeffizienten über die Temperatur

Gerät:	Bähr DIL802	Bähr DIL804	Vertikaldilatometer
Anfangslänge:	49,97 mm	9,98 mm	26,00 mm
Durchmesser:	5,00 mm	5,00 mm	6,00 mm
Meßsystem:	Quarz	Quarz	Quarz
Atmosphäre:	Vakuum	Vakuum	Vakuum
Bezugstemperatur:	25 °C	25 °C	20 °C

Temperatur [°C]	Alpha [$1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$]	Alpha [$1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$]	Alpha [$1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$]
50	8.3170	11.6666	12,2
75	8.1369	12.3155	
100	8.6505	12.6861	12,6
125	9.3456	12.8876	
150	10.0380	13.1534	12,8
175	10.7438	13.4088	
200	11.4034	13.5089	13,1
225	11.9242	13.6756	
250	12.4012	13.8668	13,3
275	12.7997	14.0460	
300	13.1184	14.2646	13,6
325	13.3940	14.3922	
350	13.6285	14.5368	13,8
375	13.8329	14.7193	
400	14.0292	14.8421	14,0
425	14.2130	14.9186	
450	14.3964	15.0857	14,2
475	14.5207	15.1581	
500	14.6437	15.2525	14,4
525	14.7476	15.3561	
550	14.8276	15.4401	14,6
575	14.9031	15.4958	
600	14.9728	15.5467	14,8
625	15.0183	15.5850	
650	15.0644	15.6300	14,9
675	15.1106	15.6594	
700	15.1534	15.7181	15,0
725	15.1800	15.7358	
750	14.3874	14.9087	14,1
775	13.6767	13.9757	
800	12.8229	12.9771	12,5
825	11.9787	12.4888	
850	11.6293	12.7039	11,6
875	11.8408	13.0974	
900	12.1554	13.4669	12,2
925		13.8280	
950		14.1772	12,8
975		14.5167	
1000		14.7919	13,2

A19 Verlauf des spezifischen elektrischen Widerstandes über die Temperatur

Temperatur [°C]	spez. elektr. Widerstand [$\mu\Omega\text{m}$]	Temperatur [°C]	spez. elektr. Widerstand [$\mu\Omega\text{m}$]
20	0,245	550	0,726
50	0,264	600	0,795
100	0,296	650	0,871
150	0,331	700	0,959
200	0,368	750	1,065
250	0,408	800	1,101
300	0,451	850	1,126
350	0,499	900	1,155
400	0,549	950	1,183
450	0,604	1000	1,209
500	0,662	1050	1,237

A20 Verlauf der Wärmeleitfähigkeit über die Temperatur

Temperatur [°C]	Wärme- leitfähigkeit [W/(m·K)]	Temperatur [°C]	Wärme- leitfähigkeit [W/(m·K)]
20	40,4	550	36,5
50	40,9	600	35,4
100	41,6	650	34,3
150	41,7	700	32,9
200	41,7	750	31,4
250	41,4	800	31,8
300	40,9	850	32,4
350	40,1	900	32,8
400	39,3	950	33,3
450	38,4	1000	33,8
500	37,5	1050	34,2

Temperatur [°C]	mittl. spez. Wärmekapazität [J/(kg·K)]	Temperatur [°C]	mittl. spez. Wärmekapazität [J/(kg·K)]
20	461	550	564
50	462	600	579
100	464	650	596
150	471	700	612
200	480		
250	490		
300	500		
350	511		
400	523		
450	536		
500	550		

A22 Programmcode des Ansys®-Batchfiles zur numerischen Simulation des Schweißprozesses unter einachsiger Beanspruchung bei zunächst vollständiger Bauteiltrennung

```
/Batch
/clear
/config,Nres,20000
/config,nproc,4

! *****
! *** Simulation der Temperaturverteilung bzw. Schweißeigenspannungen ***
! *** Forschungsvorhaben "Schweißen unter Last "                einachsig ***
! *** Ansys-Version 7.1                      Batch-File-Version 26.06.2004 ***
! *****

! *****
! *** Festlegung der Eingangsparameter ***
! *****

! *** Wahl der durchzuführenden Berechnung ***

rechart=0                      !Wahl der Berechnung:
                                !0 : Berechnung des Temperaturfeldes und der Struktur
                                !1 : Berechnung des Temperaturfeldes

! *** Eingangsparameter der Geometrie ***

breit=0.30                     !Probenbreite des Werkstücks           in m
lang=0.10                     !Probenlänge des Werkstücks           in m
bt=0.006                      !Probendicke des Werkstücks           in m
nahtub=0.001                  !Nahtüberhöhung der Schweißnaht       in m
Wurzelub=0.0005               !Wurzelüberhöhung der Schweißnaht     in m
spu=0.001                     !Spaltbreite unten                   in m
spo=0.004                     !Spaltbreite oben                    in m
ab1=0.01                     !Breite des Abschnitt 1              in m
ab2=0.02                     !Breite des Abschnitt 2              in m

! *** Eingangsparameter der Vernetzungssteuerung ***

tl1=5                         !Teilung des Abschnitts 1            [Anzahl]    in Stück
tl2=7                         !Teilung des Abschnitts 2            [Anzahl]    in Stück
```

t13=15	!Teilung des Abschnitts 3	[Anzahl]	in Stück
t14=5	!Teilung des Abschnitts 4	[Anzahl]	in Stück
t15=5	!Teilung des Abschnitts 5	[Anzahl]	in Stück
t16=150	!Teilung des Abschnitts 6	[Anzahl]	in Stück
t17=150	!Teilung des Abschnitts 7	[Anzahl]	in Stück
t18=150	!Teilung des Abschnitts 8	[Anzahl]	in Stück
t19=5	!Teilung des Abschnitts 9	[Anzahl]	in Stück
t110=5	!Teilung des Abschnitts 10	[Anzahl]	in Stück

! *** Angaben zum Schweißprozeß ***

Strom=165	!Stromstärke	in Ampere
Spann=23.5	!Stromspannung	in Volt
eta=0.95	!Wirkungsfaktor eta für MAG = 0,90	
SCHWEI=65	!Dauer des Schweißvorganges pro Lage	in sec

! *** Angabe zum Elementvorlauf beim Schweißprozess ***

Vorlauf=3	!Steuerungsvariable für Schweißnahtelementvorlauf	in Stück
-----------	---	----------

! *** Schweißbadabmessungen (Achtung: Halbachsen) ***

alang=0.004	!Schmelzbadbreite	in m
blang=0.007	!Schmelzbadtiefe	in m
c1lang=0.004	!vordere Schmelzbadlänge	in m
c2lang=0.008	!hintere Schmelzbadlänge	in m

! *** Eingangsparameter zur Temperaturfeldberechnung ***

Umgeb=20	!Temperatur der Umgebungsluft	in Grad Celsius
Bauteil=20	!Bauteiltemperatur vor dem Schweißen	in Grad Celsius
einspan=20	!Temperatur an der Einspannung	in Grad Celsius

epsilon=0.90	!Emissionskoeffizient Strahlung
--------------	---------------------------------

! *** Angaben zur Lastaufbringung ***

!Zur Simulation einer in Ruhe geschweißten Naht, sind die Amplitudenausschlä-
!ge auf Null zu setzen. Das Zeitinkrement ergibt sich für die strukture-
!mechanische Berechnung im Fall der "Ruhe" aus der Frequenz geteilt durch die
!Stützstellenzahl "Stutz". Bsp.: 1 Hz / 20 Stutz = 0,05 sec

!Beanspruchung in Längsrichtung senkrecht zur Naht

```

Ampli=0.00015      !Amplitude der Bewegung der Nahtflanken      in m
                    !Da Symmetrie nur halbe Amplitude angeben!!!

Frequenz=1          !Frequenz der Bewegung der Nahtflanken      in Hz

Last=850000         !Maximale Zylinderlast                in N

```

Dauer=5	!Zeit der Lasteinwirkung nach dem Schweißen	in sec
Stutz=40	!Anzahl der Stützstellen pro Doppelwelle	in Anzahl
Anzschla=10	!Anzahl der Teilungen vom Schweißende	
	!bis zum Einwirkungsende	in Anzahl
Unteil=10	!Einteilung der Zeitintervalle pro Element	in Anzahl/El

```
! *** Angaben zur Simulation nach dem Ende des Schweißprozesses bzw. der Ein-
wirkung ***
```

```
Geszeit=100      !Gesamtsimulationszeit           in sec
Anzende=30       !Anzahl der Teilungen nach der Einwirkung
                  !bis zum Simulationsende         in Anzahl
```

```
! *** Berechnung von PI ***
```

```
*AFUN,RAD      !Umstellung auf RAD als Winkeleinheit
PI=ACOS(-1)    !Berechnung von Pi
*AFUN,DEG      !Umstellung auf Grad als Winkeleinheit
```

```
! *** Berechnung von Steuerparametern ***
```

[illegible]

```
!Zeitschritt für Temperaturfeldberechnung vomEinwirkungsende bis
!Simulationsende
```

```
Zeitab2=(Geszeit-dauer-schwei)/Anzende
```

```
! *** Steuerung der Berechnung des Temperaturfeldes ***
```

```
KBCSCHT=1                !Einstellung der Temperaturaufbringung
                          !0 = rampenförmig, 1 = stufenförmig
```

```
Zeit=0.0001              !Variable zur Steuerung
```

```
! *****
```

```
! *** Aufbau der Geometrie ***
```

```
! *****
```

```
! *** Bestimmung der Koordinaten der Keypoints ***
```

```
x1=0
```

```
y1=breit                !Keypoint Nr. 1
```

```
z1=bt+nahtub
```

```
x2=0
```

```
y2=0                    !Keypoint Nr. 2
```

```
z2=bt+nahtub
```

```
x3=spo
```

```
y3=0                    !Keypoint Nr. 3
```

```
z3=bt
```

```
x4=spo+ab1
```

```
y4=0                    !Keypoint Nr. 4
```

```
z4=bt
```

```
x5=spo+ab1+ab2
```

```
y5=0                    !Keypoint Nr. 5
```

```
z5=bt
```

```
x6=lang
```

```
y6=0                    !Keypoint Nr. 6
```

```
z6=bt
```

```
x7=lang
```

```
y7=breit                !Keypoint Nr. 7
```

```
z7=bt
```

```
x8=spo+ab1+ab2
```

```
y8=breit                !Keypoint Nr. 8
```

```
z8=bt
```

```
x9=spo+ab1
y9=breit          !Keypoint Nr. 9
z9=bt
x10=spo
y10=breit         !Keypoint Nr. 10
z10=bt
x11=0
y11=breit         !Keypoint Nr. 11
z11=-wurzelub
x12=0
y12=0            !Keypoint Nr. 12
z12=-wurzelub
x13=spu
y13=0            !Keypoint Nr. 13
z13=0
x14=spo+ab1
y14=0            !Keypoint Nr. 14
z14=0
x15=spo+ab1+ab2
y15=0            !Keypoint Nr. 15
z15=0
x16=lang
y16=0            !Keypoint Nr. 16
z16=0
x17=lang
y17=breit        !Keypoint Nr. 17
z17=0
x18=spo+ab1+ab2
y18=breit        !Keypoint Nr. 18
z18=0
x19=spo+ab1
y19=breit        !Keypoint Nr. 19
z19=0
x20=spu
y20=breit        !Keypoint Nr. 20
z20=0

! *** Bestimmung des Radius für die Nahtoberfläche ***

*AFUN,DEG          !Einheiten für Winkelfunktionen sind Grad
deltax=x3-x2       !Horizontale Differenz zwischen Keypoint Nr.2 u. Nr. 3
deltaz=z3-z2       !Vertikale Differenz zwischen Keypoint Nr. 2 u. Nr. 3
```

!Bestimmung der Sehnenneigung zwischen Keypoint Nr. 2 und Nr. 3

alpha=ATAN(deltaz/deltax)

teilsehn=SQRT(deltax**2+deltaz**2) !Ermittlung der halben Sehnennlänge

radius=teilsehn/sin(alpha) !Bestimmung des Radius

! *****

! *** TRANSIENTE TEMPERATURFELDBERECHNUNG ***

! *****

! *** PREPROCESSING ***

/Prep7 !Aufruf des Preprocessors

! *** Elementtyp ***

ET,1,SOLID70 !Element-Typennr. 1 * 3D-Temperatur-Volumenelement

! *** Werkstoffparameter setzen ***

MPTMP,1,0,20,50,100,150,200

MPDATA,DENS,1,1,7850,7837,7828,7813,7798,7781 ! Dichte in kg/m^3

MPTMP,7,250,300,350,400,450,500

MPDATA,DENS,1,7,7765,7748,7731,7713,7695,7676 !Dichte in kg/m^3

MPTMP,13,550,600,650,700,750,800

MPDATA,DENS,1,13,7658,7638,7620,7602,7600,7612 !Dichte in kg/m^3

MPTMP,19,850,900,950,1000,1050,1100

MPDATA,DENS,1,19,7615,7590,7563,7540,7514,7498 !Dichte in kg/m^3

MPTMP,25,1150,1200,1250,1300,1350,1400

MPDATA,DENS,1,25,7482,7466,7450,7434,7418,7402 !Dichte in kg/m^3

MPTMP,31,1450,1500,1550,2850,2860,3000

MPDATA,DENS,1,31,7386,7370,7075,6300,6296,6238 !Dichte in kg/m^3

MPTMP,1,0,20,50,100,150,200

MPDATA,NUXY,1,1,0.284,0.284,0.286,0.288,0.290,0.292

MPDATA,NUYZ,1,1,0.284,0.284,0.286,0.288,0.290,0.292 !Querdehnzahl Nü

MPDATA,NUXZ,1,1,0.284,0.284,0.286,0.288,0.290,0.292

MPTEMP,7,250,300,350,400,450,500,550

MPDATA,NUXY,1,7,0.294,0.296,0.298,0.300,0.305,0.310

MPDATA,NUYZ,1,7,0.294,0.296,0.298,0.300,0.305,0.310

!Querdehnzahl Nü

MPDATA,NUXZ,1,7,0.294,0.296,0.298,0.300,0.305,0.310

MPTEMP,13,550,600,650,700,750,800

MPDATA,NUXY,1,13,0.315,0.320,0.325,0.330,0.335,0.340

MPDATA,NUYZ,1,13,0.315,0.320,0.325,0.330,0.335,0.340

!Querdehnzahl Nü

MPDATA,NUXZ,1,13,0.315,0.320,0.325,0.330,0.335,0.340

MPTEMP,19,850,900,950,1000,1050,1100

MPDATA,NUXY,1,19,0.345,0.350,0.355,0.360,0.386,0.412

MPDATA,NUYZ,1,19,0.345,0.350,0.355,0.360,0.386,0.412

!Querdehnzahl Nü

MPDATA,NUXZ,1,19,0.345,0.350,0.355,0.360,0.386,0.412

MPTEMP,25,1150,1200,1250,1300,1350,1400

MPDATA,NUXY,1,25,0.438,0.464,0.490,0.490,0.490,0.490

MPDATA,NUYZ,1,25,0.438,0.464,0.490,0.490,0.490,0.490

!Querdehnzahl Nü

MPDATA,NUXZ,1,25,0.438,0.464,0.490,0.490,0.490,0.490

MPTEMP,31,1450,1500,1550,2850,2860,3000

MPDATA,NUXY,1,31,0.490,0.490,0.490,0.490,0.490,0.490

MPDATA,NUYZ,1,31,0.490,0.490,0.490,0.490,0.490,0.490

!Querdehnzahl Nü

MPDATA,NUXZ,1,31,0.490,0.490,0.490,0.490,0.490,0.490

!Wärmeleitfähigkeit in W/(m*K)

MPTEMP,1,0,20,50,100,150,200

MPDATA,KXX,1,1,40.200,40.404,40.903,41.550,41.731,41.675

MPDATA,KYY,1,1,40.200,40.404,40.903,41.550,41.731,41.675

MPDATA,KZZ,1,1,40.200,40.404,40.903,41.550,41.731,41.675

!Wärmeleitfähigkeit in W/(m*K)

MPTEMP,7,250,300,350,400,450,500

MPDATA,KXX,1,7,41.357,40.853,40.078,39.312,38.391,37.475

MPDATA,KYY,1,7,41.357,40.853,40.078,39.312,38.391,37.475

MPDATA,KZZ,1,7,41.357,40.853,40.078,39.312,38.391,37.475

!Wärmeleitfähigkeit in W/(m*K)

MPTEMP,13,550,600,650,700,750,800

MPDATA,KXX,1,13,36.441,35.379,34.247,32.938,31.388,31.741

MPDATA,KYY,1,13,36.441,35.379,34.247,32.938,31.388,31.741

MPDATA, KZZ, 1, 13, 36.441, 35.379, 34.247, 32.938, 31.388, 31.741

!Wärmeleitfähigkeit in W/(m*K)

MPTEMP, 19, 850, 900, 950, 1000, 1050, 1100

MPDATA, KXX, 1, 19, 32.341, 32.816, 33.292, 33.794, 34.227, 35.000

MPDATA, KYY, 1, 19, 32.341, 32.816, 33.292, 33.794, 34.227, 35.000

MPDATA, KZZ, 1, 19, 32.341, 32.816, 33.292, 33.794, 34.227, 35.000

!Wärmeleitfähigkeit in W/(m*K)

MPTEMP, 25, 1150, 1200, 1250, 1300, 1350, 1400

MPDATA, KXX, 1, 25, 36.000, 37.000, 37.167, 37.333, 37.500, 37.667

MPDATA, KYY, 1, 25, 36.000, 37.000, 37.167, 37.333, 37.500, 37.667

MPDATA, KZZ, 1, 25, 36.000, 37.000, 37.167, 37.333, 37.500, 37.667

!Wärmeleitfähigkeit in W/(m*K)

MPTEMP, 31, 1450, 1500, 1550, 2850, 2860, 3000

MPDATA, KXX, 1, 31, 37.834, 38.000, 38.100, 363.567, 365.996, 400.000

MPDATA, KYY, 1, 31, 37.834, 38.000, 38.100, 363.567, 365.996, 400.000

MPDATA, KZZ, 1, 31, 37.834, 38.000, 38.100, 363.567, 365.996, 400.000

!Mittl. spez. Wärmekapazität in J/(kg*K)

MPTEMP, 1, 0, 20, 50, 100, 150, 200

MPDATA, C, 1, 1, 460.00, 461.00, 462.00, 464.00, 471.00, 480.00

!Mittl. spez. Wärmekapazität in J/(kg*K)

MPTEMP, 7, 250, 300, 350, 400, 450, 500

MPDATA, C, 1, 7, 490.00, 500.00, 511.00, 523.00, 536.00, 550.00

!Mittl. spez. Wärmekapazität in J/(kg*K)

MPTEMP, 13, 550, 600, 650, 700, 750, 800

MPDATA, C, 1, 13, 564.00, 579.00, 596.00, 612.00, 700.00, 900.00

MPTEMP, 19, 850, 900, 950, 1000, 1050, 1100

!Mittl. spez. Wärmekapazität in J/(kg*K)

MPDATA, C, 1, 19, 700.00, 600.00, 616.36, 632.73, 649.09, 665.45

MPTEMP, 25, 1150, 1200, 1250, 1300, 1350, 1400

!Mittl. spez. Wärmekapazität in J/(kg*K)

MPDATA, C, 1, 25, 681.82, 698.18, 714.55, 730.91, 747.27, 763.64

MPTEMP, 31, 1450, 1500, 1550, 2850, 2860, 3000

!Mittl. spez. Wärmekapazität in J/(kg*K)

MPDATA, C, 1, 31, 780.00, 780.00, 790.00, 800.00, 800.50, 801.15

!HINWEIS: Ist die Enthalpie aktiviert, so werden die Eingaben zur Dichte und spez. Wärmekapazität ignoriert!

!Mittl. spez. Enthalpie in J/(m³)

MPTEMP,1,0,20,50,100,150,200

MPDATA,ENTH,1,1,0,72238570,180679938,253283747,435732370,620927889

!Mittl. spez. Enthalpie in J/(m³)

MPTEMP,7,250,300,350,400,450,500

MPDATA,ENTH,1,7,809429320,1001400591,1197006348,1396610711,1600568032,
1809229334

!Mittl. spez. Enthalpie in J/(m³)

MPTEMP,13,550,600,650,700,750,800

MPDATA,ENTH,1,13,2022750760,2241285869,2465388722,2695233203,2944531400,
3248790429

!Mittl. spez. Enthalpie in J/(m³)

MPTEMP,19,850,900,950,1000,1050,1100

MPDATA,ENTH,1,19,3553312420,3800411770,4030799725,4266616806,4507822511,
4754495798

!Mittl. spez. Enthalpie in J/(m³)

MPTEMP,25,1150,1200,1250,1300,1350,1400

MPDATA,ENTH,1,25,5006771501,5264623438,5528025427,5796951287,6071374836,
6351269891

!Mittl. spez. Enthalpie in J/(m³)

MPTEMP,31,1450,1500,1550,2850,2860,3000

MPDATA,ENTH,1,31,6636610272,6924354770,9167596283,16076641683,56195027563,
56897460044

!Wärmeausdehnungskoeffizient in 1/K

MPTEMP,1,0,20,50,100,150,200

MPDATA,ALPX,1,1,12.0000e-6,12.0000e-6,12.2000e-6,12.6431e-6,12.9767e-
6,13.3045e-6

MPDATA,ALPY,1,1,12.0000e-6,12.0000e-6,12.2000e-6,12.6431e-6,12.9767e-
6,13.3045e-6

MPDATA,ALPZ,1,1,12.0000e-6,12.0000e-6,12.2000e-6,12.6431e-6,12.9767e-
6,13.3045e-6

!Wärmeausdehnungskoeffizient in 1/K

MPTEMP,7,250,300,350,400,450,500

MPDATA,ALPX,1,7,13.5834e-6,13.9323e-6,14.1684e-6,14.2904e-6,14.5607e-6,14.7654e-6

MPDATA,ALPY,1,7,13.5834e-6,13.9323e-6,14.1684e-6,14.2904e-6,14.5607e-6,14.7654e-6

MPDATA,ALPZ,1,7,13.5834e-6,13.9323e-6,14.1684e-6,14.2904e-6,14.5607e-6,14.7654e-6

!Wärmeausdehnungskoeffizient in 1/K

MPTEMP,13,550,600,650,700,750,800

MPDATA,ALPX,1,13,14.9559e-6,15.1065e-6,15.1981e-6,15.2905e-6,14.4654e-6,12.7667e-6

MPDATA,ALPY,1,13,14.9559e-6,15.1065e-6,15.1981e-6,15.2905e-6,14.4654e-6,12.7667e-6

MPDATA,ALPZ,1,13,14.9559e-6,15.1065e-6,15.1981e-6,15.2905e-6,14.4654e-6,12.7667e-6

!Wärmeausdehnungskoeffizient in 1/K

MPTEMP,19,850,900,950,1000,1050,1100

MPDATA,ALPX,1,19,11.9777e-6,12.2000e-6,12.8000e-6,13.2000e-6,13.7000e-6,13.9000e-6

MPDATA,ALPY,1,19,11.9777e-6,12.2000e-6,12.8000e-6,13.2000e-6,13.7000e-6,13.9000e-6

MPDATA,ALPZ,1,19,11.9777e-6,12.2000e-6,12.8000e-6,13.2000e-6,13.7000e-6,13.9000e-6

!Wärmeausdehnungskoeffizient in 1/K

MPTEMP,25,1150,1200,1250,1300,1350,1400

MPDATA,ALPX,1,25,14.2000e-6,14.4000e-6,14.6000e-6,14.8000e-6,15.1000e-6,15.3000e-6

MPDATA,ALPY,1,25,14.2000e-6,14.4000e-6,14.6000e-6,14.8000e-6,15.1000e-6,15.3000e-6

MPDATA,ALPZ,1,25,14.2000e-6,14.4000e-6,14.6000e-6,14.8000e-6,15.1000e-6,15.3000e-6

!Wärmeausdehnungskoeffizient in 1/K

MPTEMP,31,1450,1500,1550,2850,2860,3000

MPDATA,ALPX,1,31,15.5000e-6,15.7000e-6,16.0000e-6,16.4480e-6,16.4690e-6,16.5000e-6

MPDATA,ALPY,1,31,15.5000e-6,15.7000e-6,16.0000e-6,16.4480e-6,16.4690e-6,16.5000e-6

MPDATA,ALPZ,1,31,15.5000e-6,15.7000e-6,16.0000e-6,16.4480e-6,16.4690e-6,16.5000e-6

!Ermittlung der E-Moduli für die verschiedenen Temperaturen
!WICHTIG: Damit das Materialfeld eindeutig ist, müssen die E-Moduli für alle
!Temperaturen definiert werden, auch für die Stellen, welche nicht durch KINH
!angesprochen werden. Es ist zu beachten, dass die Steigung der Zwischenwerte
!mit KINH kontrolliert wird (lineare Interpolation). Daher müssen die
!Steigungen größer oder gleich die von KINH sein.

tm0=1e6/0.0015	!E-Modul für Ersatzverhalten bei 0 Grad Celsius
tm1=351.941e6/0.0017450 in N/m^2	!E-Modul für 20 Gard Celsius (Spannung/Dehnung)
tm2=341.785e6/0.0017257 in N/m^2	!E-Modul für 50 Gard Celsius (Spannung/Dehnung)
tm3=340.660e6/0.0017062 in N/m^2	!E-Modul für 100 Gard Celsius (Spannung/Dehnung)
tm4=329.063e6/0.0015642 in N/m^2	!E-Modul für 150 Gard Celsius (Spannung/Dehnung)
tm5=300.305e6/0.0014931 in N/m^2	!E-Modul für 200 Gard Celsius (Spannung/Dehnung)
tm6=298.990e6/0.0014621 in N/m^2	!E-Modul für 250 Gard Celsius (Spannung/Dehnung)
tm7=281.515e6/0.0012935 in N/m^2	!E-Modul für 300 Gard Celsius (Spannung/Dehnung)
tm8=245.159e6/0.0013015 in N/m^2	!E-Modul für 350 Gard Celsius (Spannung/Dehnung)
tm9=188.147e6/0.0010272 in N/m^2	!E-Modul für 400 Gard Celsius (Spannung/Dehnung)
tm10=165.638e6/0.0008989 in N/m^2	!E-Modul für 450 Gard Celsius (Spannung/Dehnung)
tm11=134.551e6/0.0008015 in N/m^2	!E-Modul für 500 Gard Celsius (Spannung/Dehnung)
tm12=131.533e6/0.0009830 in N/m^2	!E-Modul für 550 Gard Celsius (Spannung/Dehnung)
tm13=143.003e6/0.0013345 in N/m^2	!E-Modul für 600 Gard Celsius (Spannung/Dehnung)
tm14=121.570e6/0.0014099 in N/m^2	!E-Modul für 650 Gard Celsius (Spannung/Dehnung)
tm15=93.399e6/0.0013217 in N/m^2	!E-Modul für 700 Gard Celsius (Spannung/Dehnung)
tm16=53.383e6/0.0009246 in N/m^2	!E-Modul für 750 Gard Celsius (Spannung/Dehnung)
tm17=45.117e6/0.0009713 in N/m^2	!E-Modul für 800 Gard Celsius (Spannung/Dehnung)

```

tm18=35.038e6/0.0011417      !E-Modul für 850 Gard Celsius (Spannung/Dehnung)
      in N/m^2
tm19=29.835e6/0.0009907      !E-Modul für 900 Gard Celsius (Spannung/Dehnung)
      in N/m^2
tm20=23.267e6/0.0011117      !E-Modul für 950 Gard Celsius (Spannung/Dehnung)
      in N/m^2
tm21=21.560e6/0.0007878      !E-Modul für 1000 Gard Celsius (Span-
      nung/Dehnung) in N/m^2
tm22=16.079e6/0.0007015      !E-Modul für 1050 Gard Celsius (Span-
      nung/Dehnung) in N/m^2
tm23=12.619e6/0.0007408      !E-Modul für 1100 Gard Celsius (Span-
      nung/Dehnung) in N/m^2
tm24=9.055e6/0.0005394       !E-Modul für 1150 Gard Celsius (Span-
      nung/Dehnung) in N/m^2
tm25=6.743e6/0.0003626       !E-Modul für 1200 Gard Celsius (Span-
      nung/Dehnung) in N/m^2
tm26=16701078150             !E-Modul für 1250 Gard Celsius (Spannung/Dehnung) in
      N/m^2
tm27=15087158500             !E-Modul für 1300 Gard Celsius (Spannung/Dehnung) in
      N/m^2
tm28=13696206700             !E-Modul für 1350 Gard Celsius (Spannung/Dehnung) in
      N/m^2
tm29=12485002800             !E-Modul für 1400 Gard Celsius (Spannung/Dehnung) in
      N/m^2
tm30=11420819000             !E-Modul für 1450 Gard Celsius (Spannung/Dehnung) in
      N/m^2
tm31=10478418400             !E-Modul für 1500 Gard Celsius (Spannung/Dehnung) in
      N/m^2
tm32=9638027400              !E-Modul für 1550 Gard Celsius (Span-
      nung/Dehnung) in N/m^2
tm33=1052210300              !E-Modul für 2850 Gard Celsius (Span-
      nung/Dehnung) in N/m^2
tm34=1024896450              !E-Modul für 2860 Gard Celsius (Span-
      nung/Dehnung) in N/m^2
tm35=1e6/0.0015              !E-Modul für 3000 Gard Celsius (Span-
      nung/Dehnung) in N/m^2

```

!Definition (Temperatur) der Stützpunkte der Werkstoffparameter

MPTEMP,1,0,20,50,100,150,200,250

!E-Moduli für die Achsen X,Y,Z in N/m^2

MPDATA,EX,1,1,tm0,tm1,tm2,tm3,tm4,tm5,tm6

MPDATA,EY,1,1,tm0,tm1,tm2,tm3,tm4,tm5,tm6

MPDATA,EZ,1,1,tm0,tm1,tm2,tm3,tm4,tm5,tm6

!Definition (Temperatur) der Stützpunkte der Werkstoffparameter

MPTEMP,7,250,300,350,400,450,500,550

!E-Moduli für die Achsen X,Y,Z in N/m²

MPDATA,EX,1,7,tm6,tm7,tm8,tm9,tm10,tm11,tm12

MPDATA,EY,1,7,tm6,tm7,tm8,tm9,tm10,tm11,tm12

MPDATA,EZ,1,7,tm6,tm7,tm8,tm9,tm10,tm11,tm12

!Definition (Temperatur) der Stützpunkte der Werkstoffparameter

MPTEMP,13,550,600,650,700,750,800,850

!E-Moduli für die Achsen X,Y,Z in N/m²

MPDATA,EX,1,13,tm12,tm13,tm14,tm15,tm16,tm17,tm18

MPDATA,EY,1,13,tm12,tm13,tm14,tm15,tm16,tm17,tm18

MPDATA,EZ,1,13,tm12,tm13,tm14,tm15,tm16,tm17,tm18

!Definition (Temperatur) der Stützpunkte der Werkstoffparameter

MPTEMP,19,850,900,950,1000,1050,1100,1150

!E-Moduli für die Achsen X,Y,Z in N/m²

MPDATA,EX,1,19,tm18,tm19,tm20,tm21,tm22,tm23,tm24

MPDATA,EY,1,19,tm18,tm19,tm20,tm21,tm22,tm23,tm24

MPDATA,EZ,1,19,tm18,tm19,tm20,tm21,tm22,tm23,tm24

!Definition (Temperatur) der Stützpunkte der Werkstoffparameter

MPTEMP,25,1150,1200,1250,1300,1350,1400,1450

!E-Moduli für die Achsen X,Y,Z in N/m²

MPDATA,EX,1,25,tm24,tm25,tm26,tm27,tm28,tm29,tm30

MPDATA,EY,1,25,tm24,tm25,tm26,tm27,tm28,tm29,tm30

MPDATA,EZ,1,25,tm24,tm25,tm26,tm27,tm28,tm29,tm30

!Definition (Temperatur) der Stützpunkte der Werkstoffparameter

MPTEMP,31,1450,1500,1550,2850,2860,3000

!E-Moduli für die Achsen X,Y,Z in N/m²

MPDATA,EX,1,31,tm30,tm31,tm32,tm33,tm34,tm35

MPDATA,EY,1,31,tm30,tm31,tm32,tm33,tm34,tm35

MPDATA,EZ,1,31,tm30,tm31,tm32,tm33,tm34,tm35

TB, KINH, 1, 27, 20	!Aktivierung eines Data-Tables für das Modell KINH mit !27 Temperaturstellen und 20 Stützstellen
TBTEMP, 0	!Temperatur 0.0 Grad Celsius (Ersatzverhalten, analog !zu 3000 Grad Celsius)
TBPT, , 0.0015, 1e6	!Dehnung=0,0015, Spannung=1e6 N/m ²
TBPT, , 0.0030, 1e6	!Dehnung=0,0030, Spannung=1e6 N/m ²
TBPT, , 0.0045, 1e6	!Dehnung=0,0045, Spannung=1e6 N/m ²
TBPT, , 0.0060, 1e6	!Dehnung=0,0060, Spannung=1e6 N/m ²
TBPT, , 0.0075, 1e6	!Dehnung=0,0075, Spannung=1e6 N/m ²
TBPT, , 0.0105, 1e6	!Dehnung=0,0105, Spannung=1e6 N/m ²
TBPT, , 0.0150, 1e6	!Dehnung=0,0150, Spannung=1e6 N/m ²
TBPT, , 0.0175, 1e6	!Dehnung=0,0175, Spannung=1e6 N/m ²
TBPT, , 0.0250, 1e6	!Dehnung=0,0250, Spannung=1e6 N/m ²
TBPT, , 0.0400, 1e6	!Dehnung=0,0400, Spannung=1e6 N/m ²
TBPT, , 0.0500, 1e6	!Dehnung=0,0015, Spannung=1e6 N/m ²
TBPT, , 0.0600, 1e6	!Dehnung=0,0030, Spannung=1e6 N/m ²
TBPT, , 0.0700, 1e6	!Dehnung=0,0045, Spannung=1e6 N/m ²
TBPT, , 0.0800, 1e6	!Dehnung=0,0060, Spannung=1e6 N/m ²
TBPT, , 0.0900, 1e6	!Dehnung=0,0075, Spannung=1e6 N/m ²
TBPT, , 0.1000, 1e6	!Dehnung=0,0105, Spannung=1e6 N/m ²
TBPT, , 0.1100, 1e6	!Dehnung=0,0150, Spannung=1e6 N/m ²
TBPT, , 0.1200, 1e6	!Dehnung=0,0175, Spannung=1e6 N/m ²
TBPT, , 0.1300, 1e6	!Dehnung=0,0250, Spannung=1e6 N/m ²
TBPT, , 0.1400, 1e6	!Dehnung=0,0400, Spannung=1e6 N/m ²
TBTEMP, 20.0	!Temperatur 20.0 Grad Celsius
TBPT, , 0.0017450, 351.941e6	!Dehnung=0.0017450, Spannung=351.941e6 N/m ²
TBPT, , 0.0020329, 385.286e6	!Dehnung=0.0020329, Spannung=385.286e6 N/m ²
TBPT, , 0.0218063, 390.940e6	!Dehnung=0.0218063, Spannung=390.940e6 N/m ²
TBPT, , 0.0299626, 419.795e6	!Dehnung=0.0299626, Spannung=419.795e6 N/m ²
TBPT, , 0.0380858, 443.212e6	!Dehnung=0.0380858, Spannung=443.212e6 N/m ²
TBPT, , 0.0461782, 462.165e6	!Dehnung=0.0461782, Spannung=462.165e6 N/m ²
TBPT, , 0.0543963, 477.693e6	!Dehnung=0.0543963, Spannung=477.693e6 N/m ²
TBPT, , 0.0625689, 490.123e6	!Dehnung=0.0625689, Spannung=490.123e6 N/m ²
TBPT, , 0.0706899, 499.993e6	!Dehnung=0.0706899, Spannung=499.993e6 N/m ²
TBPT, , 0.0789092, 508.026e6	!Dehnung=0.0789092, Spannung=508.026e6 N/m ²
TBPT, , 0.0870454, 514.406e6	!Dehnung=0.0870454, Spannung=514.406e6 N/m ²
TBPT, , 0.0952547, 519.572e6	!Dehnung=0.0952547, Spannung=519.572e6 N/m ²
TBPT, , 0.1033610, 523.608e6	!Dehnung=0.1033610, Spannung=523.608e6 N/m ²
TBPT, , 0.1115384, 526.769e6	!Dehnung=0.1115384, Spannung=526.769e6 N/m ²
TBPT, , 0.1197728, 529.190e6	!Dehnung=0.1197728, Spannung=529.190e6 N/m ²
TBPT, , 0.1278888, 530.966e6	!Dehnung=0.1278888, Spannung=530.966e6 N/m ²

TBPT,,0.1360560,532.210e6	!Dehnung=0.1360560, Spannung=532.210e6 N/m^2
TBPT,,0.1442823,532.963e6	!Dehnung=0.1442823, Spannung=532.963e6 N/m^2
TBPT,,0.1530897,533.377e6	!Dehnung=0.1530897, Spannung=533.377e6 N/m^2
TBPT,,0.1568810,533.436e6	!Dehnung=0.1568810, Spannung=533.436e6 N/m^2

TBTEMP,50.0 !Temperatur 50.0 Grad Celsius

TBPT,,0.0017257,341.785e6	!Dehnung=0.0017257, Spannung=341.785e6 N/m^2
TBPT,,0.0020013,357.639e6	!Dehnung=0.0020013, Spannung=357.639e6 N/m^2
TBPT,,0.0205169,383.205e6	!Dehnung=0.0205169, Spannung=383.205e6 N/m^2
TBPT,,0.0277864,408.860e6	!Dehnung=0.0277864, Spannung=408.860e6 N/m^2
TBPT,,0.0351206,430.468e6	!Dehnung=0.0351206, Spannung=430.468e6 N/m^2
TBPT,,0.0425546,448.391e6	!Dehnung=0.0425546, Spannung=448.391e6 N/m^2
TBPT,,0.0499471,462.803e6	!Dehnung=0.0499471, Spannung=462.803e6 N/m^2
TBPT,,0.0572773,474.446e6	!Dehnung=0.0572773, Spannung=474.446e6 N/m^2
TBPT,,0.0646864,484.130e6	!Dehnung=0.0646864, Spannung=484.130e6 N/m^2
TBPT,,0.0720240,491.853e6	!Dehnung=0.0720240, Spannung=491.853e6 N/m^2
TBPT,,0.0794253,498.256e6	!Dehnung=0.0794253, Spannung=498.256e6 N/m^2
TBPT,,0.0867394,503.300e6	!Dehnung=0.0867394, Spannung=503.300e6 N/m^2
TBPT,,0.0941001,507.467e6	!Dehnung=0.0941001, Spannung=507.467e6 N/m^2
TBPT,,0.1015254,510.738e6	!Dehnung=0.1015254, Spannung=510.738e6 N/m^2
TBPT,,0.1088194,513.362e6	!Dehnung=0.1088194, Spannung=513.362e6 N/m^2
TBPT,,0.1161678,515.345e6	!Dehnung=0.1161678, Spannung=515.345e6 N/m^2
TBPT,,0.1235567,516.857e6	!Dehnung=0.1235567, Spannung=516.857e6 N/m^2
TBPT,,0.1309958,517.877e6	!Dehnung=0.1309958, Spannung=517.877e6 N/m^2
TBPT,,0.1383010,518.483e6	!Dehnung=0.1383010, Spannung=518.483e6 N/m^2
TBPT,,0.1458216,518.786e6	!Dehnung=0.1458216, Spannung=518.786e6 N/m^2

TBTEMP,100.0 !Temperatur 100.0 Grad Celsius

TBPT,,0.0017062,340.660e6	!Dehnung=0.0017062, Spannung=340.660e6 N/m^2
TBPT,,0.0018759,366.506e6	!Dehnung=0.0018759, Spannung=366.506e6 N/m^2
TBPT,,0.0217326,381.178e6	!Dehnung=0.0217326, Spannung=381.178e6 N/m^2
TBPT,,0.0293935,405.245e6	!Dehnung=0.0293935, Spannung=405.245e6 N/m^2
TBPT,,0.0370727,426.117e6	!Dehnung=0.0370727, Spannung=426.117e6 N/m^2
TBPT,,0.0449000,443.075e6	!Dehnung=0.0449000, Spannung=443.075e6 N/m^2
TBPT,,0.0526939,456.626e6	!Dehnung=0.0526939, Spannung=456.626e6 N/m^2
TBPT,,0.0604447,467.365e6	!Dehnung=0.0604447, Spannung=467.365e6 N/m^2
TBPT,,0.0681242,476.031e6	!Dehnung=0.0681242, Spannung=476.031e6 N/m^2
TBPT,,0.0758773,483.182e6	!Dehnung=0.0758773, Spannung=483.182e6 N/m^2
TBPT,,0.0837168,488.991e6	!Dehnung=0.0837168, Spannung=488.991e6 N/m^2
TBPT,,0.0914484,493.636e6	!Dehnung=0.0914484, Spannung=493.636e6 N/m^2
TBPT,,0.0990652,497.335e6	!Dehnung=0.0990652, Spannung=497.335e6 N/m^2
TBPT,,0.1069152,500.363e6	!Dehnung=0.1069152, Spannung=500.363e6 N/m^2
TBPT,,0.1146444,502.672e6	!Dehnung=0.1146444, Spannung=502.672e6 N/m^2

TBPT,,0.1224146,504.517e6	!Dehnung=0.1224146, Spannung=504.517e6 N/m^2
TBPT,,0.1300641,505.792e6	!Dehnung=0.1300641, Spannung=505.792e6 N/m^2
TBPT,,0.1379297,506.742e6	!Dehnung=0.1379297, Spannung=506.742e6 N/m^2
TBPT,,0.1456687,507.258e6	!Dehnung=0.1456687, Spannung=507.258e6 N/m^2
TBPT,,0.1534507,507.464e6	!Dehnung=0.1534507, Spannung=507.464e6 N/m^2

TBTEMP,150.0	!Temperatur 150.0 Grad Celsius
TBPT,,0.0015642,329.063e6	!Dehnung=0.0015642, Spannung=329.063e6 N/m^2
TBPT,,0.0021447,362.461e6	!Dehnung=0.0021447, Spannung=362.461e6 N/m^2
TBPT,,0.0226499,379.542e6	!Dehnung=0.0226499, Spannung=379.542e6 N/m^2
TBPT,,0.0299695,399.795e6	!Dehnung=0.0299695, Spannung=399.795e6 N/m^2
TBPT,,0.0372037,418.348e6	!Dehnung=0.0372037, Spannung=418.348e6 N/m^2
TBPT,,0.0445580,433.488e6	!Dehnung=0.0445580, Spannung=433.488e6 N/m^2
TBPT,,0.0518527,445.726e6	!Dehnung=0.0518527, Spannung=445.726e6 N/m^2
TBPT,,0.0592459,455.722e6	!Dehnung=0.0592459, Spannung=455.722e6 N/m^2
TBPT,,0.0665511,463.828e6	!Dehnung=0.0665511, Spannung=463.828e6 N/m^2
TBPT,,0.0737631,470.374e6	!Dehnung=0.0737631, Spannung=470.374e6 N/m^2
TBPT,,0.0811972,476.000e6	!Dehnung=0.0811972, Spannung=476.000e6 N/m^2
TBPT,,0.0885254,480.509e6	!Dehnung=0.0885254, Spannung=480.509e6 N/m^2
TBPT,,0.0958883,484.336e6	!Dehnung=0.0958883, Spannung=484.336e6 N/m^2
TBPT,,0.1031275,487.403e6	!Dehnung=0.1031275, Spannung=487.403e6 N/m^2
TBPT,,0.1104024,489.971e6	!Dehnung=0.1104024, Spannung=489.971e6 N/m^2
TBPT,,0.1177078,492.121e6	!Dehnung=0.1177078, Spannung=492.121e6 N/m^2
TBPT,,0.1250504,493.846e6	!Dehnung=0.1250504, Spannung=493.846e6 N/m^2
TBPT,,0.1324355,495.150e6	!Dehnung=0.1324355, Spannung=495.150e6 N/m^2
TBPT,,0.1396834,496.061e6	!Dehnung=0.1396834, Spannung=496.061e6 N/m^2
TBPT,,0.1471868,496.418e6	!Dehnung=0.1471868, Spannung=496.418e6 N/m^2

TBTEMP,200.0	!Temperatur 200.0 Grad Celsius
TBPT,,0.0014931,300.305e6	!Dehnung=0.0014931, Spannung=300.305e6 N/m^2
TBPT,,0.0018631,327.547e6	!Dehnung=0.0018631, Spannung=327.547e6 N/m^2
TBPT,,0.0214001,379.055e6	!Dehnung=0.0214001, Spannung=379.055e6 N/m^2
TBPT,,0.0293589,404.030e6	!Dehnung=0.0293589, Spannung=404.030e6 N/m^2
TBPT,,0.0373312,427.581e6	!Dehnung=0.0373312, Spannung=427.581e6 N/m^2
TBPT,,0.0454259,446.885e6	!Dehnung=0.0454259, Spannung=446.885e6 N/m^2
TBPT,,0.0533466,459.831e6	!Dehnung=0.0533466, Spannung=459.831e6 N/m^2
TBPT,,0.0614637,469.162e6	!Dehnung=0.0614637, Spannung=469.162e6 N/m^2
TBPT,,0.0694627,480.746e6	!Dehnung=0.0694627, Spannung=480.746e6 N/m^2
TBPT,,0.0773492,490.575e6	!Dehnung=0.0773492, Spannung=490.575e6 N/m^2
TBPT,,0.0854762,492.000e6	!Dehnung=0.0854762, Spannung=492.000e6 N/m^2
TBPT,,0.0934592,494.491e6	!Dehnung=0.0934592, Spannung=494.491e6 N/m^2
TBPT,,0.1015422,497.549e6	!Dehnung=0.1015422, Spannung=497.549e6 N/m^2
TBPT,,0.1094233,500.570e6	!Dehnung=0.1094233, Spannung=500.570e6 N/m^2

TBPT,,0.1174513,503.607e6	!Dehnung=0.1174513, Spannung=503.607e6 N/m^2
TBPT,,0.1254932,506.332e6	!Dehnung=0.1254932, Spannung=506.332e6 N/m^2
TBPT,,0.1335561,508.676e6	!Dehnung=0.1335561, Spannung=508.676e6 N/m^2
TBPT,,0.1415841,511.118e6	!Dehnung=0.1415841, Spannung=511.118e6 N/m^2
TBPT,,0.1494758,513.121e6	!Dehnung=0.1494758, Spannung=513.121e6 N/m^2
TBPT,,0.1576469,514.253e6	!Dehnung=0.1576469, Spannung=514.253e6 N/m^2

TBTEMP,250.0

!Temperatur 250.0 Grad Celsius

TBPT,,0.0014621,298.990e6	!Dehnung=0.0014621, Spannung=0.0014621 N/m^2
TBPT,,0.0037443,329.849e6	!Dehnung=0.0037443, Spannung=0.0037443 N/m^2
TBPT,,0.0145383,356.141e6	!Dehnung=0.0145383, Spannung=0.0145383 N/m^2
TBPT,,0.0218378,395.871e6	!Dehnung=0.0218378, Spannung=0.0218378 N/m^2
TBPT,,0.0296744,428.300e6	!Dehnung=0.0296744, Spannung=0.0296744 N/m^2
TBPT,,0.0376071,453.253e6	!Dehnung=0.0376071, Spannung=0.0376071 N/m^2
TBPT,,0.0449038,473.373e6	!Dehnung=0.0449038, Spannung=0.0449038 N/m^2
TBPT,,0.0530565,485.381e6	!Dehnung=0.0530565, Spannung=0.0530565 N/m^2
TBPT,,0.0604812,492.881e6	!Dehnung=0.0604812, Spannung=0.0604812 N/m^2
TBPT,,0.0685534,500.381e6	!Dehnung=0.0685534, Spannung=0.0685534 N/m^2
TBPT,,0.0760285,507.881e6	!Dehnung=0.0760285, Spannung=0.0760285 N/m^2
TBPT,,0.0839143,515.942e6	!Dehnung=0.0839143, Spannung=0.0839143 N/m^2
TBPT,,0.0916676,518.151e6	!Dehnung=0.0916676, Spannung=0.0916676 N/m^2
TBPT,,0.0994262,525.159e6	!Dehnung=0.0994262, Spannung=0.0994262 N/m^2
TBPT,,0.1071982,528.325e6	!Dehnung=0.1071982, Spannung=0.1071982 N/m^2
TBPT,,0.1148173,531.080e6	!Dehnung=0.1148173, Spannung=0.1148173 N/m^2
TBPT,,0.1225604,535.573e6	!Dehnung=0.1225604, Spannung=0.1225604 N/m^2
TBPT,,0.1298109,545.532e6	!Dehnung=0.1298109, Spannung=0.1298109 N/m^2
TBPT,,0.1379030,546.507e6	!Dehnung=0.1379030, Spannung=0.1379030 N/m^2
TBPT,,0.1452962,547.286e6	!Dehnung=0.1452962, Spannung=0.1452962 N/m^2

TBTEMP,300.0

!Temperatur 300.0 Grad Celsius

TBPT,,0.0012935,281.515e6	!Dehnung=0.0012935, Spannung=281.515e6 N/m^2
TBPT,,0.0035285,308.572e6	!Dehnung=0.0035285, Spannung=308.572e6 N/m^2
TBPT,,0.0080429,329.988e6	!Dehnung=0.0080429, Spannung=329.988e6 N/m^2
TBPT,,0.0130440,353.885e6	!Dehnung=0.0130440, Spannung=353.885e6 N/m^2
TBPT,,0.0186949,396.469e6	!Dehnung=0.0186949, Spannung=396.469e6 N/m^2
TBPT,,0.0244920,420.770e6	!Dehnung=0.0244920, Spannung=420.770e6 N/m^2
TBPT,,0.0299650,444.385e6	!Dehnung=0.0299650, Spannung=444.385e6 N/m^2
TBPT,,0.0350229,469.144e6	!Dehnung=0.0350229, Spannung=469.144e6 N/m^2
TBPT,,0.0403042,483.279e6	!Dehnung=0.0403042, Spannung=483.279e6 N/m^2
TBPT,,0.0461495,505.696e6	!Dehnung=0.0461495, Spannung=505.696e6 N/m^2
TBPT,,0.0519028,517.541e6	!Dehnung=0.0519028, Spannung=517.541e6 N/m^2
TBPT,,0.0571294,518.022e6	!Dehnung=0.0571294, Spannung=518.022e6 N/m^2
TBPT,,0.0627898,529.745e6	!Dehnung=0.0627898, Spannung=529.745e6 N/m^2

TBPT,,0.0683973,545.433e6	!Dehnung=0.0683973, Spannung=545.433e6 N/m^2
TBPT,,0.0735758,549.428e6	!Dehnung=0.0735758, Spannung=549.428e6 N/m^2
TBPT,,0.0792728,553.678e6	!Dehnung=0.0792728, Spannung=553.678e6 N/m^2
TBPT,,0.0843545,557.928e6	!Dehnung=0.0843545, Spannung=557.928e6 N/m^2
TBPT,,0.0897765,562.175e6	!Dehnung=0.0897765, Spannung=562.175e6 N/m^2
TBPT,,0.0957017,566.427e6	!Dehnung=0.0957017, Spannung=566.427e6 N/m^2
TBPT,,0.1013336,568.254e6	!Dehnung=0.1013336, Spannung=568.254e6 N/m^2

TBTEMP,350.0	!Temperatur 350.0 Grad Celsius
TBPT,,0.0013015,245.159e6	!Dehnung=0.0013015, Spannung=245.159e6 N/m^2
TBPT,,0.0036487,285.267e6	!Dehnung=0.0036487, Spannung=285.267e6 N/m^2
TBPT,,0.0085784,339.018e6	!Dehnung=0.0085784, Spannung=339.018e6 N/m^2
TBPT,,0.0158329,392.020e6	!Dehnung=0.0158329, Spannung=392.020e6 N/m^2
TBPT,,0.0229796,433.421e6	!Dehnung=0.0229796, Spannung=433.421e6 N/m^2
TBPT,,0.0301333,466.219e6	!Dehnung=0.0301333, Spannung=466.219e6 N/m^2
TBPT,,0.0372759,491.930e6	!Dehnung=0.0372759, Spannung=491.930e6 N/m^2
TBPT,,0.0445245,512.248e6	!Dehnung=0.0445245, Spannung=512.248e6 N/m^2
TBPT,,0.0516837,528.045e6	!Dehnung=0.0516837, Spannung=528.045e6 N/m^2
TBPT,,0.0588937,540.140e6	!Dehnung=0.0588937, Spannung=540.140e6 N/m^2
TBPT,,0.0660927,549.687e6	!Dehnung=0.0660927, Spannung=549.687e6 N/m^2
TBPT,,0.0732405,557.271e6	!Dehnung=0.0732405, Spannung=557.271e6 N/m^2
TBPT,,0.0804471,563.770e6	!Dehnung=0.0804471, Spannung=563.770e6 N/m^2
TBPT,,0.0875674,568.998e6	!Dehnung=0.0875674, Spannung=568.998e6 N/m^2
TBPT,,0.0947578,573.241e6	!Dehnung=0.0947578, Spannung=573.241e6 N/m^2
TBPT,,0.1019987,576.747e6	!Dehnung=0.1019987, Spannung=576.747e6 N/m^2
TBPT,,0.1091551,579.271e6	!Dehnung=0.1091551, Spannung=579.271e6 N/m^2
TBPT,,0.1163561,581.227e6	!Dehnung=0.1163561, Spannung=581.227e6 N/m^2
TBPT,,0.1234669,582.400e6	!Dehnung=0.1234669, Spannung=582.400e6 N/m^2
TBPT,,0.1308147,582.937e6	!Dehnung=0.1308147, Spannung=582.937e6 N/m^2

TBTEMP,400.0	!Temperatur 400.0 Grad Celsius
TBPT,,0.0010272,188.147e6	!Dehnung=0.0010272, Spannung=188.147e6 N/m^2
TBPT,,0.0040843,282.927e6	!Dehnung=0.0040843, Spannung=282.927e6 N/m^2
TBPT,,0.0083740,323.670e6	!Dehnung=0.0083740, Spannung=323.670e6 N/m^2
TBPT,,0.0157990,374.202e6	!Dehnung=0.0157990, Spannung=374.202e6 N/m^2
TBPT,,0.0232263,414.323e6	!Dehnung=0.0232263, Spannung=414.323e6 N/m^2
TBPT,,0.0307054,446.754e6	!Dehnung=0.0307054, Spannung=446.754e6 N/m^2
TBPT,,0.0381164,472.265e6	!Dehnung=0.0381164, Spannung=472.265e6 N/m^2
TBPT,,0.0456272,492.004e6	!Dehnung=0.0456272, Spannung=492.004e6 N/m^2
TBPT,,0.0530072,507.403e6	!Dehnung=0.0530072, Spannung=507.403e6 N/m^2
TBPT,,0.0604882,520.375e6	!Dehnung=0.0604882, Spannung=520.375e6 N/m^2
TBPT,,0.0679253,530.877e6	!Dehnung=0.0679253, Spannung=530.877e6 N/m^2
TBPT,,0.0753059,539.355e6	!Dehnung=0.0753059, Spannung=539.355e6 N/m^2

TBPT,,0.0827796,546.198e6	!Dehnung=0.0827796, Spannung=546.198e6 N/m^2
TBPT,,0.0901597,551.785e6	!Dehnung=0.0901597, Spannung=551.785e6 N/m^2
TBPT,,0.0976280,556.118e6	!Dehnung=0.0976280, Spannung=556.118e6 N/m^2
TBPT,,0.1050137,559.318e6	!Dehnung=0.1050137, Spannung=559.318e6 N/m^2
TBPT,,0.1124450,561.839e6	!Dehnung=0.1124450, Spannung=561.839e6 N/m^2
TBPT,,0.1199701,563.370e6	!Dehnung=0.1199701, Spannung=563.370e6 N/m^2
TBPT,,0.1273811,564.314e6	!Dehnung=0.1273811, Spannung=564.314e6 N/m^2
TBPT,,0.1348529,564.667e6	!Dehnung=0.1348529, Spannung=564.667e6 N/m^2

TBTEMP,450.0

!Temperatur 450.0 Grad Celsius

TBPT,,0.0008989,165.638e6	!Dehnung=0.0008989, Spannung=165.638e6 N/m^2
TBPT,,0.0035060,245.528e6	!Dehnung=0.0035060, Spannung=245.528e6 N/m^2
TBPT,,0.0064574,297.033e6	!Dehnung=0.0064574, Spannung=297.033e6 N/m^2
TBPT,,0.0121573,339.048e6	!Dehnung=0.0121573, Spannung=339.048e6 N/m^2
TBPT,,0.0178857,371.033e6	!Dehnung=0.0178857, Spannung=371.033e6 N/m^2
TBPT,,0.0236280,397.335e6	!Dehnung=0.0236280, Spannung=397.335e6 N/m^2
TBPT,,0.0295184,419.457e6	!Dehnung=0.0295184, Spannung=419.457e6 N/m^2
TBPT,,0.0352615,437.298e6	!Dehnung=0.0352615, Spannung=437.298e6 N/m^2
TBPT,,0.0409683,452.189e6	!Dehnung=0.0409683, Spannung=452.189e6 N/m^2
TBPT,,0.0467871,464.741e6	!Dehnung=0.0467871, Spannung=464.741e6 N/m^2
TBPT,,0.0525514,475.151e6	!Dehnung=0.0525514, Spannung=475.151e6 N/m^2
TBPT,,0.0582599,483.598e6	!Dehnung=0.0582599, Spannung=483.598e6 N/m^2
TBPT,,0.0640453,490.716e6	!Dehnung=0.0640453, Spannung=490.716e6 N/m^2
TBPT,,0.0697530,496.414e6	!Dehnung=0.0697530, Spannung=496.414e6 N/m^2
TBPT,,0.0755334,501.082e6	!Dehnung=0.0755334, Spannung=501.082e6 N/m^2
TBPT,,0.0813804,504.771e6	!Dehnung=0.0813804, Spannung=504.771e6 N/m^2
TBPT,,0.0871404,507.472e6	!Dehnung=0.0871404, Spannung=507.472e6 N/m^2
TBPT,,0.0927985,509.399e6	!Dehnung=0.0927985, Spannung=509.399e6 N/m^2
TBPT,,0.0986760,510.705e6	!Dehnung=0.0986760, Spannung=510.705e6 N/m^2
TBPT,,0.1044734,511.188e6	!Dehnung=0.1044734, Spannung=511.188e6 N/m^2

TBTEMP,500.0

!Temperatur 500.0 Grad Celsius

TBPT,,0.0008015,134.551e6	!Dehnung=0.0008015, Spannung=134.551e6 N/m^2
TBPT,,0.0036346,258.746e6	!Dehnung=0.0036346, Spannung=258.746e6 N/m^2
TBPT,,0.0059323,286.869e6	!Dehnung=0.0059323, Spannung=286.869e6 N/m^2
TBPT,,0.0109806,324.828e6	!Dehnung=0.0109806, Spannung=324.828e6 N/m^2
TBPT,,0.0159626,351.396e6	!Dehnung=0.0159626, Spannung=351.396e6 N/m^2
TBPT,,0.0210887,374.972e6	!Dehnung=0.0210887, Spannung=374.972e6 N/m^2
TBPT,,0.0260855,394.030e6	!Dehnung=0.0260855, Spannung=394.030e6 N/m^2
TBPT,,0.0312033,410.250e6	!Dehnung=0.0312033, Spannung=410.250e6 N/m^2
TBPT,,0.0361638,423.242e6	!Dehnung=0.0361638, Spannung=423.242e6 N/m^2
TBPT,,0.0412260,434.250e6	!Dehnung=0.0412260, Spannung=434.250e6 N/m^2
TBPT,,0.0462303,443.346e6	!Dehnung=0.0462303, Spannung=443.346e6 N/m^2

TBPT,,0.0513226,450.976e6	!Dehnung=0.0513226, Spannung=450.976e6 N/m^2
TBPT,,0.0563525,457.048e6	!Dehnung=0.0563525, Spannung=457.048e6 N/m^2
TBPT,,0.0614416,462.167e6	!Dehnung=0.0614416, Spannung=462.167e6 N/m^2
TBPT,,0.0664529,466.076e6	!Dehnung=0.0664529, Spannung=466.076e6 N/m^2
TBPT,,0.0715233,469.252e6	!Dehnung=0.0715233, Spannung=469.252e6 N/m^2
TBPT,,0.0764939,471.562e6	!Dehnung=0.0764939, Spannung=471.562e6 N/m^2
TBPT,,0.0816951,473.206e6	!Dehnung=0.0816951, Spannung=473.206e6 N/m^2
TBPT,,0.0866368,474.046e6	!Dehnung=0.0866368, Spannung=474.046e6 N/m^2
TBPT,,0.0917981,474.399e6	!Dehnung=0.0917981, Spannung=474.399e6 N/m^2

TBTEMP,550.0	!Temperatur 550.0 Grad Celsius
TBPT,,0.0009830,131.533e6	!Dehnung=0.0009830, Spannung=131.533e6 N/m^2
TBPT,,0.0037280,208.085e6	!Dehnung=0.0037280, Spannung=208.085e6 N/m^2
TBPT,,0.0041806,214.492e6	!Dehnung=0.0041806, Spannung=214.492e6 N/m^2
TBPT,,0.0076444,263.857e6	!Dehnung=0.0076444, Spannung=263.857e6 N/m^2
TBPT,,0.0111373,282.301e6	!Dehnung=0.0111373, Spannung=282.301e6 N/m^2
TBPT,,0.0147241,294.813e6	!Dehnung=0.0147241, Spannung=294.813e6 N/m^2
TBPT,,0.0183186,306.605e6	!Dehnung=0.0183186, Spannung=306.605e6 N/m^2
TBPT,,0.0218839,315.755e6	!Dehnung=0.0218839, Spannung=315.755e6 N/m^2
TBPT,,0.0253775,323.006e6	!Dehnung=0.0253775, Spannung=323.006e6 N/m^2
TBPT,,0.0289564,328.843e6	!Dehnung=0.0289564, Spannung=328.843e6 N/m^2
TBPT,,0.0326036,333.590e6	!Dehnung=0.0326036, Spannung=333.590e6 N/m^2
TBPT,,0.0361501,337.217e6	!Dehnung=0.0361501, Spannung=337.217e6 N/m^2
TBPT,,0.0395769,340.049e6	!Dehnung=0.0395769, Spannung=340.049e6 N/m^2
TBPT,,0.0432106,342.406e6	!Dehnung=0.0432106, Spannung=342.406e6 N/m^2
TBPT,,0.0467287,344.049e6	!Dehnung=0.0467287, Spannung=344.049e6 N/m^2
TBPT,,0.0502763,345.332e6	!Dehnung=0.0502763, Spannung=345.332e6 N/m^2
TBPT,,0.0538552,346.255e6	!Dehnung=0.0538552, Spannung=346.255e6 N/m^2
TBPT,,0.0574673,346.833e6	!Dehnung=0.0574673, Spannung=346.833e6 N/m^2
TBPT,,0.0609177,347.237e6	!Dehnung=0.0609177, Spannung=347.237e6 N/m^2
TBPT,,0.0645723,347.397e6	!Dehnung=0.0645723, Spannung=347.397e6 N/m^2

TBTEMP,600.0	!Temperatur 600.0 Grad Celsius
TBPT,,0.0013345,143.003e6	!Dehnung=0.0013345, Spannung=143.003e6 N/m^2
TBPT,,0.0038955,205.650e6	!Dehnung=0.0038955, Spannung=205.650e6 N/m^2
TBPT,,0.0044590,207.972e6	!Dehnung=0.0044590, Spannung=207.972e6 N/m^2
TBPT,,0.0074418,216.586e6	!Dehnung=0.0074418, Spannung=216.586e6 N/m^2
TBPT,,0.0102048,220.283e6	!Dehnung=0.0102048, Spannung=220.283e6 N/m^2
TBPT,,0.0130759,224.252e6	!Dehnung=0.0130759, Spannung=224.252e6 N/m^2
TBPT,,0.0160914,228.265e6	!Dehnung=0.0160914, Spannung=228.265e6 N/m^2
TBPT,,0.0188423,231.019e6	!Dehnung=0.0188423, Spannung=231.019e6 N/m^2
TBPT,,0.0218282,233.226e6	!Dehnung=0.0218282, Spannung=233.226e6 N/m^2
TBPT,,0.0246668,234.953e6	!Dehnung=0.0246668, Spannung=234.953e6 N/m^2

TBPT,,0.0275421,236.298e6	!Dehnung=0.0275421, Spannung=236.298e6 N/m^2
TBPT,,0.0304452,237.351e6	!Dehnung=0.0304452, Spannung=237.351e6 N/m^2
TBPT,,0.0333134,237.777e6	!Dehnung=0.0333134, Spannung=237.777e6 N/m^2
TBPT,,0.0362441,238.492e6	!Dehnung=0.0362441, Spannung=238.492e6 N/m^2
TBPT,,0.0391884,239.065e6	!Dehnung=0.0391884, Spannung=239.065e6 N/m^2
TBPT,,0.0419566,239.411e6	!Dehnung=0.0419566, Spannung=239.411e6 N/m^2
TBPT,,0.0449272,239.744e6	!Dehnung=0.0449272, Spannung=239.744e6 N/m^2
TBPT,,0.0477037,239.975e6	!Dehnung=0.0477037, Spannung=239.975e6 N/m^2
TBPT,,0.0506876,240.153e6	!Dehnung=0.0506876, Spannung=240.153e6 N/m^2
TBPT,,0.0536788,240.229e6	!Dehnung=0.0536788, Spannung=240.229e6 N/m^2
TBTEMP,650.0	!Temperatur 650.0 Grad Celsius
TBPT,,0.0014099,121.570e6	!Dehnung=0.0014099, Spannung=121.570e6 N/m^2
TBPT,,0.0037250,151.873e6	!Dehnung=0.0037250, Spannung=151.873e6 N/m^2
TBPT,,0.0046694,154.145e6	!Dehnung=0.0046694, Spannung=154.145e6 N/m^2
TBPT,,0.0056716,155.888e6	!Dehnung=0.0056716, Spannung=155.888e6 N/m^2
TBPT,,0.0076769,158.143e6	!Dehnung=0.0076769, Spannung=158.143e6 N/m^2
TBPT,,0.0096846,158.143e6	!Dehnung=0.0096846, Spannung=158.143e6 N/m^2
TBPT,,0.0117897,159.820e6	!Dehnung=0.0117897, Spannung=159.820e6 N/m^2
TBPT,,0.0138513,160.895e6	!Dehnung=0.0138513, Spannung=160.895e6 N/m^2
TBPT,,0.0158585,162.209e6	!Dehnung=0.0158585, Spannung=162.209e6 N/m^2
TBPT,,0.0179039,163.233e6	!Dehnung=0.0179039, Spannung=163.233e6 N/m^2
TBPT,,0.0197984,163.880e6	!Dehnung=0.0197984, Spannung=163.880e6 N/m^2
TBPT,,0.0219002,164.462e6	!Dehnung=0.0219002, Spannung=164.462e6 N/m^2
TBPT,,0.0240075,164.976e6	!Dehnung=0.0240075, Spannung=164.976e6 N/m^2
TBPT,,0.0259384,165.338e6	!Dehnung=0.0259384, Spannung=165.338e6 N/m^2
TBPT,,0.0280812,165.611e6	!Dehnung=0.0280812, Spannung=165.611e6 N/m^2
TBPT,,0.0300466,165.772e6	!Dehnung=0.0300466, Spannung=165.772e6 N/m^2
TBPT,,0.0322115,165.906e6	!Dehnung=0.0322115, Spannung=165.906e6 N/m^2
TBPT,,0.0341781,166.044e6	!Dehnung=0.0341781, Spannung=166.044e6 N/m^2
TBPT,,0.0361599,166.097e6	!Dehnung=0.0361599, Spannung=166.097e6 N/m^2
TBPT,,0.0383360,166.173e6	!Dehnung=0.0383360, Spannung=166.173e6 N/m^2
TBTEMP,700.0	!Temperatur 700.0 Grad Celsius
TBPT,,0.0013217,93.399e6	!Dehnung=0.0013217, Spannung=93.399e6 N/m^2
TBPT,,0.0038787,116.406e6	!Dehnung=0.0038787, Spannung=116.406e6 N/m^2
TBPT,,0.0041971,116.909e6	!Dehnung=0.0041971, Spannung=116.909e6 N/m^2
TBPT,,0.0046960,117.534e6	!Dehnung=0.0046960, Spannung=117.534e6 N/m^2
TBPT,,0.0062295,119.140e6	!Dehnung=0.0062295, Spannung=119.140e6 N/m^2
TBPT,,0.0080020,119.884e6	!Dehnung=0.0080020, Spannung=119.884e6 N/m^2
TBPT,,0.0095003,120.187e6	!Dehnung=0.0095003, Spannung=120.187e6 N/m^2

TBPT,,0.0111939,120.566e6 N/m^2	!Dehnung=0.0111939, Spannung=120.566e6
TBPT,,0.0127430,120.870e6	!Dehnung=0.0127430, Spannung=120.870e6 N/m^2
TBPT,,0.0144783,121.211e6	!Dehnung=0.0144783, Spannung=121.211e6 N/m^2
TBPT,,0.0160201,121.514e6	!Dehnung=0.0160201, Spannung=121.514e6 N/m^2
TBPT,,0.0177369,121.893e6	!Dehnung=0.0177369, Spannung=121.893e6 N/m^2
TBPT,,0.0192760,122.163e6	!Dehnung=0.0192760, Spannung=122.163e6 N/m^2
TBPT,,0.0210085,122.450e6	!Dehnung=0.0210085, Spannung=122.450e6 N/m^2
TBPT,,0.0225622,122.634e6	!Dehnung=0.0225622, Spannung=122.634e6 N/m^2
TBPT,,0.0243412,122.720e6	!Dehnung=0.0243412, Spannung=122.720e6 N/m^2
TBPT,,0.0259148,122.814e6	!Dehnung=0.0259148, Spannung=122.814e6 N/m^2
TBPT,,0.0275028,122.850e6	!Dehnung=0.0275028, Spannung=122.850e6 N/m^2
TBPT,,0.0290993,122.885e6	!Dehnung=0.0290993, Spannung=122.885e6 N/m^2
TBPT,,0.0308774,122.921e6	!Dehnung=0.0308774, Spannung=122.921e6 N/m^2
TBTEMP,750.0	!Temperatur 750.0 Grad Celsius
TBPT,,0.0009246,53.383e6	!Dehnung=0.0009246, Spannung=53.383e6 N/m^2
TBPT,,0.0034082,75.783e6	!Dehnung=0.0034082, Spannung=75.783e6 N/m^2
TBPT,,0.0045610,77.145e6	!Dehnung=0.0045610, Spannung=77.145e6 N/m^2
TBPT,,0.0079766,78.896e6	!Dehnung=0.0079766, Spannung=78.896e6 N/m^2
TBPT,,0.0115113,79.799e6	!Dehnung=0.0115113, Spannung=79.799e6 N/m^2
TBPT,,0.0150585,80.703e6	!Dehnung=0.0150585, Spannung=80.703e6 N/m^2
TBPT,,0.0185763,81.599e6	!Dehnung=0.0185763, Spannung=81.599e6 N/m^2
TBPT,,0.0221059,82.384e6	!Dehnung=0.0221059, Spannung=82.384e6 N/m^2
TBPT,,0.0257072,82.929e6	!Dehnung=0.0257072, Spannung=82.929e6 N/m^2
TBPT,,0.0293138,83.422e6	!Dehnung=0.0293138, Spannung=83.422e6 N/m^2
TBPT,,0.0327927,83.732e6	!Dehnung=0.0327927, Spannung=83.732e6 N/m^2
TBPT,,0.0362502,84.065e6	!Dehnung=0.0362502, Spannung=84.065e6 N/m^2
TBPT,,0.0397454,84.300e6	!Dehnung=0.0397454, Spannung=84.300e6 N/m^2
TBPT,,0.0433982,84.579e6	!Dehnung=0.0433982, Spannung=84.579e6 N/m^2
TBPT,,0.0469393,84.686e6	!Dehnung=0.0469393, Spannung=84.686e6 N/m^2
TBPT,,0.0504268,84.894e6	!Dehnung=0.0504268, Spannung=84.894e6 N/m^2
TBPT,,0.0539980,84.930e6	!Dehnung=0.0539980, Spannung=84.930e6 N/m^2
TBPT,,0.0575098,85.076e6	!Dehnung=0.0575098, Spannung=85.076e6 N/m^2
TBPT,,0.0609085,85.125e6	!Dehnung=0.0609085, Spannung=85.125e6 N/m^2
TBPT,,0.0646200,85.187e6	!Dehnung=0.0646200, Spannung=85.187e6 N/m^2
TBTEMP,800.0	!Temperatur 800.0 Grad Celsius
TBPT,,0.0009713,45.117e6	!Dehnung=0.0009713, Spannung=45.117e6 N/m^2
TBPT,,0.0037645,71.326e6	!Dehnung=0.0037645, Spannung=71.326e6 N/m^2
TBPT,,0.0063651,73.577e6	!Dehnung=0.0063651, Spannung=73.577e6 N/m^2
TBPT,,0.0113367,75.364e6	!Dehnung=0.0113367, Spannung=75.364e6 N/m^2
TBPT,,0.0162992,77.032e6	!Dehnung=0.0162992, Spannung=77.032e6 N/m^2

TBPT,,0.0214168,78.547e6	!Dehnung=0.0214168, Spannung=78.547e6 N/m^2
TBPT,,0.0264118,79.675e6	!Dehnung=0.0264118, Spannung=79.675e6 N/m^2
TBPT,,0.0314554,80.540e6	!Dehnung=0.0314554, Spannung=80.540e6 N/m^2
TBPT,,0.0363412,81.221e6	!Dehnung=0.0363412, Spannung=81.221e6 N/m^2
TBPT,,0.0414323,81.796e6	!Dehnung=0.0414323, Spannung=81.796e6 N/m^2
TBPT,,0.0465047,82.358e6	!Dehnung=0.0465047, Spannung=82.358e6 N/m^2
TBPT,,0.0514498,82.728e6	!Dehnung=0.0514498, Spannung=82.728e6 N/m^2
TBPT,,0.0564113,83.036e6	!Dehnung=0.0564113, Spannung=83.036e6 N/m^2
TBPT,,0.0615686,83.303e6	!Dehnung=0.0615686, Spannung=83.303e6 N/m^2
TBPT,,0.0665670,83.490e6	!Dehnung=0.0665670, Spannung=83.490e6 N/m^2
TBPT,,0.0715920,83.615e6	!Dehnung=0.0715920, Spannung=83.615e6 N/m^2
TBPT,,0.0766008,83.758e6	!Dehnung=0.0766008, Spannung=83.758e6 N/m^2
TBPT,,0.0816421,83.838e6	!Dehnung=0.0816421, Spannung=83.838e6 N/m^2
TBPT,,0.0866926,83.896e6	!Dehnung=0.0866926, Spannung=83.896e6 N/m^2
TBPT,,0.0917475,83.945e6	!Dehnung=0.0917475, Spannung=83.945e6 N/m^2

TBTEMP,850.0

!Temperatur 850.0 Grad Celsius

TBPT,,0.0011417,35.038e6	!Dehnung=0.0011417, Spannung=35.038e6 N/m^2
TBPT,,0.0037969,55.786e6	!Dehnung=0.0037969, Spannung=55.786e6 N/m^2
TBPT,,0.0112138,61.484e6	!Dehnung=0.0112138, Spannung=61.484e6 N/m^2
TBPT,,0.0208591,66.714e6	!Dehnung=0.0208591, Spannung=66.714e6 N/m^2
TBPT,,0.0306058,69.797e6	!Dehnung=0.0306058, Spannung=69.797e6 N/m^2
TBPT,,0.0402740,71.744e6	!Dehnung=0.0402740, Spannung=71.744e6 N/m^2
TBPT,,0.0498293,73.084e6	!Dehnung=0.0498293, Spannung=73.084e6 N/m^2
TBPT,,0.0596358,74.175e6	!Dehnung=0.0596358, Spannung=74.175e6 N/m^2
TBPT,,0.0691686,75.031e6	!Dehnung=0.0691686, Spannung=75.031e6 N/m^2
TBPT,,0.0789390,75.732e6	!Dehnung=0.0789390, Spannung=75.732e6 N/m^2
TBPT,,0.0886001,76.278e6	!Dehnung=0.0886001, Spannung=76.278e6 N/m^2
TBPT,,0.0982509,76.788e6	!Dehnung=0.0982509, Spannung=76.788e6 N/m^2
TBPT,,0.1080025,77.143e6	!Dehnung=0.1080025, Spannung=77.143e6 N/m^2
TBPT,,0.1175664,77.476e6	!Dehnung=0.1175664, Spannung=77.476e6 N/m^2
TBPT,,0.1272092,77.702e6	!Dehnung=0.1272092, Spannung=77.702e6 N/m^2
TBPT,,0.1369513,77.870e6	!Dehnung=0.1369513, Spannung=77.870e6 N/m^2
TBPT,,0.1465871,78.017e6	!Dehnung=0.1465871, Spannung=78.017e6 N/m^2
TBPT,,0.1563034,78.132e6	!Dehnung=0.1563034, Spannung=78.132e6 N/m^2
TBPT,,0.1659579,78.137e6	!Dehnung=0.1659579, Spannung=78.137e6 N/m^2
TBPT,,0.1757424,78.181e6	!Dehnung=0.1757424, Spannung=78.181e6 N/m^2

TBTEMP,900.0

!Temperatur 900.0 Grad Celsius

TBPT,,0.0009907,29.835e6	!Dehnung=0.0009907, Spannung=29.835e6 N/m^2
TBPT,,0.0037223,47.085e6	!Dehnung=0.0037223, Spannung=47.085e6 N/m^2
TBPT,,0.0096307,51.596e6	!Dehnung=0.0096307, Spannung=51.596e6 N/m^2
TBPT,,0.0180718,55.559e6	!Dehnung=0.0180718, Spannung=55.559e6 N/m^2

TBPT,,0.0264274,58.024e6	!Dehnung=0.0264274, Spannung=58.024e6 N/m^2
TBPT,,0.0349377,59.702e6	!Dehnung=0.0349377, Spannung=59.702e6 N/m^2
TBPT,,0.0431877,60.901e6	!Dehnung=0.0431877, Spannung=60.901e6 N/m^2
TBPT,,0.0516263,61.902e6	!Dehnung=0.0516263, Spannung=61.902e6 N/m^2
TBPT,,0.0601204,62.669e6	!Dehnung=0.0601204, Spannung=62.669e6 N/m^2
TBPT,,0.0684327,63.338e6	!Dehnung=0.0684327, Spannung=63.338e6 N/m^2
TBPT,,0.0769463,63.895e6	!Dehnung=0.0769463, Spannung=63.895e6 N/m^2
TBPT,,0.0852931,64.370e6	!Dehnung=0.0852931, Spannung=64.370e6 N/m^2
TBPT,,0.0936758,64.747e6	!Dehnung=0.0936758, Spannung=64.747e6 N/m^2
TBPT,,0.1020680,65.075e6	!Dehnung=0.1020680, Spannung=65.075e6 N/m^2
TBPT,,0.1104744,65.353e6	!Dehnung=0.1104744, Spannung=65.353e6 N/m^2
TBPT,,0.1188788,65.605e6	!Dehnung=0.1188788, Spannung=65.605e6 N/m^2
TBPT,,0.1273502,65.757e6	!Dehnung=0.1273502, Spannung=65.757e6 N/m^2
TBPT,,0.1358076,65.914e6	!Dehnung=0.1358076, Spannung=65.914e6 N/m^2
TBPT,,0.1441482,65.995e6	!Dehnung=0.1441482, Spannung=65.995e6 N/m^2
TBPT,,0.1526639,66.072e6	!Dehnung=0.1526639, Spannung=66.072e6 N/m^2
 TBTEMP,950.0	 !Temperatur 950.0 Grad Celsius
TBPT,,0.0011117,23.267e6	!Dehnung=0.0011117, Spannung=23.267e6 N/m^2
TBPT,,0.0038174,38.305e6	!Dehnung=0.0038174, Spannung=38.305e6 N/m^2
TBPT,,0.0086891,41.757e6	!Dehnung=0.0086891, Spannung=41.757e6 N/m^2
TBPT,,0.0159189,44.225e6	!Dehnung=0.0159189, Spannung=44.225e6 N/m^2
TBPT,,0.0231967,46.259e6	!Dehnung=0.0231967, Spannung=46.259e6 N/m^2
TBPT,,0.0302738,47.577e6	!Dehnung=0.0302738, Spannung=47.577e6 N/m^2
TBPT,,0.0375709,48.598e6	!Dehnung=0.0375709, Spannung=48.598e6 N/m^2
TBPT,,0.0447498,49.355e6	!Dehnung=0.0447498, Spannung=49.355e6 N/m^2
TBPT,,0.0521046,50.009e6	!Dehnung=0.0521046, Spannung=50.009e6 N/m^2
TBPT,,0.0592892,50.562e6	!Dehnung=0.0592892, Spannung=50.562e6 N/m^2
TBPT,,0.0665071,50.999e6	!Dehnung=0.0665071, Spannung=50.999e6 N/m^2
TBPT,,0.0737237,51.389e6	!Dehnung=0.0737237, Spannung=51.389e6 N/m^2
TBPT,,0.0809269,51.751e6	!Dehnung=0.0809269, Spannung=51.751e6 N/m^2
TBPT,,0.0881912,52.003e6	!Dehnung=0.0881912, Spannung=52.003e6 N/m^2
TBPT,,0.0952950,52.211e6	!Dehnung=0.0952950, Spannung=52.211e6 N/m^2
TBPT,,0.1025585,52.419e6	!Dehnung=0.1025585, Spannung=52.419e6 N/m^2
TBPT,,0.1098585,52.569e6	!Dehnung=0.1098585, Spannung=52.569e6 N/m^2
TBPT,,0.1170196,52.666e6	!Dehnung=0.1170196, Spannung=52.666e6 N/m^2
TBPT,,0.1242019,52.737e6	!Dehnung=0.1242019, Spannung=52.737e6 N/m^2
TBPT,,0.1315588,52.804e6	!Dehnung=0.1315588, Spannung=52.804e6 N/m^2
 TBTEMP,1000.0	 !Temperatur 1000.0 Grad Celsius
TBPT,,0.0007878,21.560e6	!Dehnung=0.0007878, Spannung=21.560e6 N/m^2
TBPT,,0.0033018,32.015e6	!Dehnung=0.0033018, Spannung=32.015e6 N/m^2
TBPT,,0.0074573,34.487e6	!Dehnung=0.0074573, Spannung=34.487e6 N/m^2

TBPT,,0.0138836,36.193e6	!Dehnung=0.0138836, Spannung=36.193e6 N/m^2
TBPT,,0.0203941,37.846e6	!Dehnung=0.0203941, Spannung=37.846e6 N/m^2
TBPT,,0.0267344,38.855e6	!Dehnung=0.0267344, Spannung=38.855e6 N/m^2
TBPT,,0.0333174,39.613e6	!Dehnung=0.0333174, Spannung=39.613e6 N/m^2
TBPT,,0.0398264,40.183e6	!Dehnung=0.0398264, Spannung=40.183e6 N/m^2
TBPT,,0.0461694,40.730e6	!Dehnung=0.0461694, Spannung=40.730e6 N/m^2
TBPT,,0.0527475,41.219e6	!Dehnung=0.0527475, Spannung=41.219e6 N/m^2
TBPT,,0.0591692,41.618e6	!Dehnung=0.0591692, Spannung=41.618e6 N/m^2
TBPT,,0.0655688,41.999e6	!Dehnung=0.0655688, Spannung=41.999e6 N/m^2
TBPT,,0.0719837,42.322e6	!Dehnung=0.0719837, Spannung=42.322e6 N/m^2
TBPT,,0.0786271,42.564e6	!Dehnung=0.0786271, Spannung=42.564e6 N/m^2
TBPT,,0.0850811,42.793e6	!Dehnung=0.0850811, Spannung=42.793e6 N/m^2
TBPT,,0.0913833,42.972e6	!Dehnung=0.0913833, Spannung=42.972e6 N/m^2
TBPT,,0.0978508,43.152e6	!Dehnung=0.0978508, Spannung=43.152e6 N/m^2
TBPT,,0.1043849,43.255e6	!Dehnung=0.1043849, Spannung=43.255e6 N/m^2
TBPT,,0.1108100,43.291e6	!Dehnung=0.1108100, Spannung=43.291e6 N/m^2
TBPT,,0.1174213,43.322e6	!Dehnung=0.1174213, Spannung=43.322e6 N/m^2

TBTEMP,1050.0

!Temperatur 1050.0 Grad Celsius

TBPT,,0.0007015,16.079e6	!Dehnung=0.0007015, Spannung=16.079e6 N/m^2
TBPT,,0.0030661,24.418e6	!Dehnung=0.0030661, Spannung=24.418e6 N/m^2
TBPT,,0.0078852,27.092e6	!Dehnung=0.0078852, Spannung=27.092e6 N/m^2
TBPT,,0.0149160,28.971e6	!Dehnung=0.0149160, Spannung=28.971e6 N/m^2
TBPT,,0.0220972,30.583e6	!Dehnung=0.0220972, Spannung=30.583e6 N/m^2
TBPT,,0.0291904,31.761e6	!Dehnung=0.0291904, Spannung=31.761e6 N/m^2
TBPT,,0.0362828,32.743e6	!Dehnung=0.0362828, Spannung=32.743e6 N/m^2
TBPT,,0.0432125,33.565e6	!Dehnung=0.0432125, Spannung=33.565e6 N/m^2
TBPT,,0.0504512,34.327e6	!Dehnung=0.0504512, Spannung=34.327e6 N/m^2
TBPT,,0.0573713,34.963e6	!Dehnung=0.0573713, Spannung=34.963e6 N/m^2
TBPT,,0.0646182,35.547e6	!Dehnung=0.0646182, Spannung=35.547e6 N/m^2
TBPT,,0.0717049,36.057e6	!Dehnung=0.0717049, Spannung=36.057e6 N/m^2
TBPT,,0.0787473,36.561e6	!Dehnung=0.0787473, Spannung=36.561e6 N/m^2
TBPT,,0.0858417,36.968e6	!Dehnung=0.0858417, Spannung=36.968e6 N/m^2
TBPT,,0.0929274,37.347e6	!Dehnung=0.0929274, Spannung=37.347e6 N/m^2
TBPT,,0.1000181,37.688e6	!Dehnung=0.1000181, Spannung=37.688e6 N/m^2
TBPT,,0.1069739,37.973e6	!Dehnung=0.1069739, Spannung=37.973e6 N/m^2
TBPT,,0.1141189,38.221e6	!Dehnung=0.1141189, Spannung=38.221e6 N/m^2
TBPT,,0.1212009,38.361e6	!Dehnung=0.1212009, Spannung=38.361e6 N/m^2
TBPT,,0.1283697,38.426e6	!Dehnung=0.1283697, Spannung=38.426e6 N/m^2

TBTEMP,1100.0

!Temperatur 1100.0 Grad Celsius

TBPT,,0.0007408,12.619e6	!Dehnung=0.0007408, Spannung=12.619e6 N/m^2
TBPT,,0.0030880,18.263e6	!Dehnung=0.0030880, Spannung=18.263e6 N/m^2

TBPT,,0.0077901,20.505e6	!Dehnung=0.0077901, Spannung=20.505e6 N/m^2
TBPT,,0.0149283,21.976e6	!Dehnung=0.0149283, Spannung=21.976e6 N/m^2
TBPT,,0.0220330,23.340e6	!Dehnung=0.0220330, Spannung=23.340e6 N/m^2
TBPT,,0.0291391,24.382e6	!Dehnung=0.0291391, Spannung=24.382e6 N/m^2
TBPT,,0.0362182,25.242e6	!Dehnung=0.0362182, Spannung=25.242e6 N/m^2
TBPT,,0.0432534,25.999e6	!Dehnung=0.0432534, Spannung=25.999e6 N/m^2
TBPT,,0.0504196,26.687e6	!Dehnung=0.0504196, Spannung=26.687e6 N/m^2
TBPT,,0.0574011,27.281e6	!Dehnung=0.0574011, Spannung=27.281e6 N/m^2
TBPT,,0.0645034,27.851e6	!Dehnung=0.0645034, Spannung=27.851e6 N/m^2
TBPT,,0.0715755,28.381e6	!Dehnung=0.0715755, Spannung=28.381e6 N/m^2
TBPT,,0.0786788,28.825e6	!Dehnung=0.0786788, Spannung=28.825e6 N/m^2
TBPT,,0.0857840,29.224e6	!Dehnung=0.0857840, Spannung=29.224e6 N/m^2
TBPT,,0.0929232,29.554e6	!Dehnung=0.0929232, Spannung=29.554e6 N/m^2
TBPT,,0.1000021,29.899e6	!Dehnung=0.1000021, Spannung=29.899e6 N/m^2
TBPT,,0.1069664,30.170e6	!Dehnung=0.1069664, Spannung=30.170e6 N/m^2
TBPT,,0.1140623,30.329e6	!Dehnung=0.1140623, Spannung=30.329e6 N/m^2
TBPT,,0.1209582,30.492e6	!Dehnung=0.1209582, Spannung=30.492e6 N/m^2
TBPT,,0.1250000,30.544e6	!Dehnung=0.1250000, Spannung=30.544e6 N/m^2
TBTEMP,1150.0	!Temperatur 1150.0 Grad Celsius
TBPT,,0.0005394,9.055e6	!Dehnung=0.0005394, Spannung=9.055e6 N/m^2
TBPT,,0.0028331,14.705e6	!Dehnung=0.0028331, Spannung=14.705e6 N/m^2
TBPT,,0.0070874,16.497e6	!Dehnung=0.0070874, Spannung=16.497e6 N/m^2
TBPT,,0.0136018,17.664e6	!Dehnung=0.0136018, Spannung=17.664e6 N/m^2
TBPT,,0.0200107,18.695e6	!Dehnung=0.0200107, Spannung=18.695e6 N/m^2
TBPT,,0.0265374,19.545e6	!Dehnung=0.0265374, Spannung=19.545e6 N/m^2
TBPT,,0.0330107,20.267e6	!Dehnung=0.0330107, Spannung=20.267e6 N/m^2
TBPT,,0.0394593,20.879e6	!Dehnung=0.0394593, Spannung=20.879e6 N/m^2
TBPT,,0.0460506,21.430e6	!Dehnung=0.0460506, Spannung=21.430e6 N/m^2
TBPT,,0.0524283,21.923e6	!Dehnung=0.0524283, Spannung=21.923e6 N/m^2
TBPT,,0.0589717,22.363e6	!Dehnung=0.0589717, Spannung=22.363e6 N/m^2
TBPT,,0.0654958,22.764e6	!Dehnung=0.0654958, Spannung=22.764e6 N/m^2
TBPT,,0.0720022,23.130e6	!Dehnung=0.0720022, Spannung=23.130e6 N/m^2
TBPT,,0.0785190,23.451e6	!Dehnung=0.0785190, Spannung=23.451e6 N/m^2
TBPT,,0.0848200,23.764e6	!Dehnung=0.0848200, Spannung=23.764e6 N/m^2
TBPT,,0.0913817,23.993e6	!Dehnung=0.0913817, Spannung=23.993e6 N/m^2
TBPT,,0.0979066,24.226e6	!Dehnung=0.0979066, Spannung=24.226e6 N/m^2
TBPT,,0.1044457,24.429e6	!Dehnung=0.1044457, Spannung=24.429e6 N/m^2
TBPT,,0.1108954,24.565e6	!Dehnung=0.1108954, Spannung=24.565e6 N/m^2
TBPT,,0.1174535,24.631e6	!Dehnung=0.1174535, Spannung=24.631e6 N/m^2
TBTEMP,1200.0	!Temperatur 1200.0 Grad Celsius
TBPT,,0.0003626,6.743e6	!Dehnung=0.0003626, Spannung=6.743e6 N/m^2

TBPT,,0.0026657,11.720e6	!Dehnung=0.0026657, Spannung=11.720e6 N/m^2
TBPT,,0.0064131,12.971e6	!Dehnung=0.0064131, Spannung=12.971e6 N/m^2
TBPT,,0.0123163,13.881e6	!Dehnung=0.0123163, Spannung=13.881e6 N/m^2
TBPT,,0.0184592,14.535e6	!Dehnung=0.0184592, Spannung=14.535e6 N/m^2
TBPT,,0.0243796,15.208e6	!Dehnung=0.0243796, Spannung=15.208e6 N/m^2
TBPT,,0.0304435,15.785e6	!Dehnung=0.0304435, Spannung=15.785e6 N/m^2
TBPT,,0.0364720,16.287e6	!Dehnung=0.0364720, Spannung=16.287e6 N/m^2
TBPT,,0.0424670,16.737e6	!Dehnung=0.0424670, Spannung=16.737e6 N/m^2
TBPT,,0.0483001,17.111e6	!Dehnung=0.0483001, Spannung=17.111e6 N/m^2
TBPT,,0.0544482,17.468e6	!Dehnung=0.0544482, Spannung=17.468e6 N/m^2
TBPT,,0.0604038,17.789e6	!Dehnung=0.0604038, Spannung=17.789e6 N/m^2
TBPT,,0.0663484,18.084e6	!Dehnung=0.0663484, Spannung=18.084e6 N/m^2
TBPT,,0.0723539,18.313e6	!Dehnung=0.0723539, Spannung=18.313e6 N/m^2
TBPT,,0.0784376,18.573e6	!Dehnung=0.0784376, Spannung=18.573e6 N/m^2
TBPT,,0.0844115,18.776e6	!Dehnung=0.0844115, Spannung=18.776e6 N/m^2
TBPT,,0.0904005,18.952e6	!Dehnung=0.0904005, Spannung=18.952e6 N/m^2
TBPT,,0.0963972,19.111e6	!Dehnung=0.0963972, Spannung=19.111e6 N/m^2
TBPT,,0.1024773,19.216e6	!Dehnung=0.1024773, Spannung=19.216e6 N/m^2
TBPT,,0.1084807,19.269e6	!Dehnung=0.1084807, Spannung=19.269e6 N/m^2

TBTEMP,3000.0	!Temperatur 3000.0 Grad Celsius
TBPT,,0.0015,1e6	!Dehnung=0,0015, Spannung=1e6 N/m^2
TBPT,,0.0030,1e6	!Dehnung=0,0030, Spannung=1e6 N/m^2
TBPT,,0.0045,1e6	!Dehnung=0,0045, Spannung=1e6 N/m^2
TBPT,,0.0060,1e6	!Dehnung=0,0060, Spannung=1e6 N/m^2
TBPT,,0.0075,1e6	!Dehnung=0,0075, Spannung=1e6 N/m^2
TBPT,,0.0105,1e6	!Dehnung=0,0105, Spannung=1e6 N/m^2
TBPT,,0.0150,1e6	!Dehnung=0,0150, Spannung=1e6 N/m^2
TBPT,,0.0175,1e6	!Dehnung=0,0175, Spannung=1e6 N/m^2
TBPT,,0.0250,1e6	!Dehnung=0,0250, Spannung=1e6 N/m^2
TBPT,,0.0400,1e6	!Dehnung=0,0400, Spannung=1e6 N/m^2
TBPT,,0.0500,1e6	!Dehnung=0,0015, Spannung=1e6 N/m^2
TBPT,,0.0600,1e6	!Dehnung=0,0030, Spannung=1e6 N/m^2
TBPT,,0.0700,1e6	!Dehnung=0,0045, Spannung=1e6 N/m^2
TBPT,,0.0800,1e6	!Dehnung=0,0060, Spannung=1e6 N/m^2
TBPT,,0.0900,1e6	!Dehnung=0,0075, Spannung=1e6 N/m^2
TBPT,,0.1000,1e6	!Dehnung=0,0105, Spannung=1e6 N/m^2
TBPT,,0.1100,1e6	!Dehnung=0,0150, Spannung=1e6 N/m^2
TBPT,,0.1200,1e6	!Dehnung=0,0175, Spannung=1e6 N/m^2
TBPT,,0.1300,1e6	!Dehnung=0,0250, Spannung=1e6 N/m^2
TBPT,,0.1400,1e6	!Dehnung=0,0400, Spannung=1e6 N/m^2

! *** Erzeugen der Keypoints für die Probe ***

! *** Keypoints der oberen Ebene ***

k,1,x1,y1,z1	!Verwendung der Geo.-Parameter zur Bild. von Keypoint-Nr.1
k,2,x2,y2,z2	!Verwendung der Geo.-Parameter zur Bild. von Keypoint-Nr.2
k,3,x3,y3,z3	!Verwendung der Geo.-Parameter zur Bild. von Keypoint-Nr.3
k,4,x4,y4,z4	!Verwendung der Geo.-Parameter zur Bild. von Keypoint-Nr.4
k,5,x5,y5,z5	!Verwendung der Geo.-Parameter zur Bild. von Keypoint-Nr.5
k,6,x6,y6,z6	!Verwendung der Geo.-Parameter zur Bild. von Keypoint-Nr.6
k,7,x7,y7,z7	!Verwendung der Geo.-Parameter zur Bild. von Keypoint-Nr.7
k,8,x8,y8,z8	!Verwendung der Geo.-Parameter zur Bild. von Keypoint-Nr.8
k,9,x9,y9,z9	!Verwendung der Geo.-Parameter zur Bild. von Keypoint-Nr.9
k,10,x10,y10,z10	!Verwendung der Geo.-Parameter zur Bild. von Keypoint-Nr.10

! *** Keypoints der unteren Ebene ***

k,11,x11,y11,z11	!Verwendung der Geo.-Parameter zur Bild. von Keypoint-Nr.11
k,12,x12,y12,z12	!Verwendung der Geo.-Parameter zur Bild. von Keypoint-Nr.12
k,13,x13,y13,z13	!Verwendung der Geo.-Parameter zur Bild. von Keypoint-Nr.13
k,14,x14,y14,z14	!Verwendung der Geo.-Parameter zur Bild. von Keypoint-Nr.14
k,15,x15,y15,z15	!Verwendung der Geo.-Parameter zur Bild. von Keypoint-Nr.15
k,16,x16,y16,z16	!Verwendung der Geo.-Parameter zur Bild. von Keypoint-Nr.16
k,17,x17,y17,z17	!Verwendung der Geo.-Parameter zur Bild. von Keypoint-Nr.17
k,18,x18,y18,z18	!Verwendung der Geo.-Parameter zur Bild. von Keypoint-Nr.18
k,19,x19,y19,z19	!Verwendung der Geo.-Parameter zur Bild. von Keypoint-Nr.19
k,20,x20,y20,z20	!Verwendung der Geo.-Parameter zur Bild. von Keypoint-Nr.20

! *** Erzeugen der Berandungslinien für das Volumenmodell ***

! *** Linien der oberen Ebene

L,1,2	!Linie Nr.1 zwischen den Keypoints Nr. 1 und Nr. 2
LARC,3,2,4,radius	!Linie Nr.2 zwischen den Keypoints Nr. 2 und Nr. 3
L,3,4	!Linie Nr.3 zwischen den Keypoints Nr. 3 und Nr. 4
L,4,5	!Linie Nr.4 zwischen den Keypoints Nr. 4 und Nr. 5
L,5,6	!Linie Nr.5 zwischen den Keypoints Nr. 5 und Nr. 6
L,6,7	!Linie Nr.6 zwischen den Keypoints Nr. 6 und Nr. 7
L,7,8	!Linie Nr.7 zwischen den Keypoints Nr. 7 und Nr. 8
L,8,9	!Linie Nr.8 zwischen den Keypoints Nr. 8 und Nr. 9
L,9,10	!Linie Nr.9 zwischen den Keypoints Nr. 9 und Nr. 10
LARC,10,1,9,radius	!Linie Nr.10 zwischen den Keypoints Nr. 10 und Nr. 1
L,10,3	!Linie Nr.11 zwischen den Keypoints Nr. 10 und Nr. 3

! *** Linien der unteren Ebene

L,11,12	!Linie Nr.12 zwischen den Keypoints Nr. 11 und Nr. 12
L,12,13	!Linie Nr.13 zwischen den Keypoints Nr. 12 und Nr. 13
L,13,14	!Linie Nr.14 zwischen den Keypoints Nr. 13 und Nr. 14
L,14,15	!Linie Nr.15 zwischen den Keypoints Nr. 14 und Nr. 15
L,15,16	!Linie Nr.16 zwischen den Keypoints Nr. 15 und Nr. 16
L,16,17	!Linie Nr.17 zwischen den Keypoints Nr. 16 und Nr. 17
L,17,18	!Linie Nr.18 zwischen den Keypoints Nr. 17 und Nr. 18
L,18,19	!Linie Nr.19 zwischen den Keypoints Nr. 18 und Nr. 19
L,19,20	!Linie Nr.20 zwischen den Keypoints Nr. 19 und Nr. 20
L,20,11	!Linie Nr.21 zwischen den Keypoints Nr. 20 und Nr. 11
L,20,13	!Linie Nr.22 zwischen den Keypoints Nr. 20 und Nr. 13

! *** Verbindungslinien ***

L,11,1	!Linie Nr.23 zwischen den Keypoints Nr. 11 und Nr. 1
L,20,10	!Linie Nr.24 zwischen den Keypoints Nr. 10 und Nr. 10
L,17,7	!Linie Nr.25 zwischen den Keypoints Nr. 17 und Nr. 7
L,12,2	!Linie Nr.26 zwischen den Keypoints Nr. 12 und Nr. 2
L,13,3	!Linie Nr.27 zwischen den Keypoints Nr. 13 und Nr. 3
L,16,6	!Linie Nr.28 zwischen den Keypoints Nr. 16 und Nr. 6

! *** Innere Linien ***

L,9,4	!Linie Nr.29 zwischen den Keypoints Nr. 9 und Nr. 4
L,8,5	!Linie Nr.30 zwischen den Keypoints Nr. 8 und Nr. 5
L,19,14	!Linie Nr.31 zwischen den Keypoints Nr. 19 und Nr. 14
L,18,15	!Linie Nr.32 zwischen den Keypoints Nr. 18 und Nr. 15
L,14,4	!Linie Nr.33 zwischen den Keypoints Nr. 14 und Nr. 4
L,15,5	!Linie Nr.34 zwischen den Keypoints Nr. 15 und Nr. 5
L,19,9	!Linie Nr.35 zwischen den Keypoints Nr. 19 und Nr. 9
L,18,8	!Linie Nr.36 zwischen den Keypoints Nr. 18 und Nr. 8

! *** Festlegung der Elementgrößen an den Umrandungslinien ***

LESIZE,1,,,t16	!Unterteilung der Linie Nr. 1 in Teilung TL6
LESIZE,2,,,t15	!Unterteilung der Linie Nr. 2 in Teilung TL5
LESIZE,3,,,t11	!Unterteilung der Linie Nr. 3 in Teilung TL1
LESIZE,4,,,t12	!Unterteilung der Linie Nr. 4 in Teilung TL2
LESIZE,5,,,t13	!Unterteilung der Linie Nr. 5 in Teilung TL3

LESIZE,6,,,t18	!Unterteilung der Linie Nr. 6 in Teilung TL6
LESIZE,7,,,t13	!Unterteilung der Linie Nr. 7 in Teilung TL3
LESIZE,8,,,t12	!Unterteilung der Linie Nr. 8 in Teilung TL2
LESIZE,9,,,t11	!Unterteilung der Linie Nr. 9 in Teilung TL1
LESIZE,10,,,t15	!Unterteilung der Linie Nr. 10 in Teilung TL5
LESIZE,11,,,t16	!Unterteilung der Linie Nr. 11 in Teilung TL6
LESIZE,12,,,t16	!Unterteilung der Linie Nr. 12 in Teilung TL6
LESIZE,13,,,t15	!Unterteilung der Linie Nr. 13 in Teilung TL5
LESIZE,14,,,t11	!Unterteilung der Linie Nr. 14 in Teilung TL1
LESIZE,15,,,t12	!Unterteilung der Linie Nr. 15 in Teilung TL2
LESIZE,16,,,t13	!Unterteilung der Linie Nr. 16 in Teilung TL3
LESIZE,17,,,t18	!Unterteilung der Linie Nr. 17 in Teilung TL6
LESIZE,18,,,t13	!Unterteilung der Linie Nr. 18 in Teilung TL3
LESIZE,19,,,t12	!Unterteilung der Linie Nr. 19 in Teilung TL6
LESIZE,20,,,t11	!Unterteilung der Linie Nr. 20 in Teilung TL1
LESIZE,21,,,t15	!Unterteilung der Linie Nr. 21 in Teilung TL5
LESIZE,22,,,t16	!Unterteilung der Linie Nr. 22 in Teilung TL6
LESIZE,23,,,t14	!Unterteilung der Linie Nr. 23 in Teilung TL4
LESIZE,24,,,t14	!Unterteilung der Linie Nr. 24 in Teilung TL4
LESIZE,25,,,t110	!Unterteilung der Linie Nr. 25 in Teilung TL4
LESIZE,26,,,t14	!Unterteilung der Linie Nr. 26 in Teilung TL4
LESIZE,27,,,t14	!Unterteilung der Linie Nr. 27 in Teilung TL4
LESIZE,28,,,t110	!Unterteilung der Linie Nr. 28 in Teilung TL4
LESIZE,29,,,t17	!Unterteilung der Linie Nr. 29 in Teilung TL6
LESIZE,30,,,t18	!Unterteilung der Linie Nr. 30 in Teilung TL6
LESIZE,31,,,t17	!Unterteilung der Linie Nr. 31 in Teilung TL6
LESIZE,32,,,t18	!Unterteilung der Linie Nr. 32 in Teilung TL6
LESIZE,33,,,t19	!Unterteilung der Linie Nr. 33 in Teilung TL4
LESIZE,34,,,t110	!Unterteilung der Linie Nr. 34 in Teilung TL4
LESIZE,35,,,t19	!Unterteilung der Linie Nr. 35 in Teilung TL4
LESIZE,36,,,t110	!Unterteilung der Linie Nr. 36 in Teilung TL4

! *** Definition von Flächen und Volumen ***

! *** Definition der Volumen eingrenzenden Flächen ***

AL,1,26,12,23	!Fläche der Symmetrieachse	Fläche NR.1
AL,2,27,13,26	!Stirnfläche der Schweißnaht	Fläche NR.2
AL,11,27,22,24	!Fläche der Nahtflanke	Fläche NR.3
AL,10,24,21,23	!Stirnfläche der Schweißnaht	Fläche NR.4
AL,1,2,11,10	!Fläche der Decklage	Fläche NR.5
AL,12,13,22,21	!Fläche der Wurzellage	Fläche NR.6
AL,3,33,14,27	!Hintere Seitenfläche	Fläche NR.7

AL,4,34,15,33	!Hintere Seitenfläche	Fläche NR.8
AL,5,28,16,34	!Hintere Seitenfläche	Fläche NR.9
AL,6,28,17,25	!Strinseite Blech (Einspannung)	Fläche NR.10
AL,7,25,18,36	!Vordere Seitenfläche	Fläche NR.11
AL,8,36,19,35	!Vordere Seitenfläche	Fläche NR.12
AL,9,35,20,24	!Vordere Seitenfläche	Fläche NR.13
AL,11,3,29,9	!Obere Deckfläche	Fläche NR.14
AL,29,4,30,8	!Obere Deckfläche	Fläche NR.15
AL,30,5,6,7	!Obere Deckfläche	Fläche NR.16
AL,22,14,31,20	!Untere Deckfläche	Fläche NR.17
AL,31,15,32,19	!Untere Deckfläche	Fläche NR.18
AL,32,16,17,18	!Untere Deckfläche	Fläche NR.19
AL,29,33,31,35	!Begrenzung Grobkornzone	Fläche Nr.20
AL,30,34,32,36	!Begrenzung Feinkornzone	Fläche Nr.21

! *** Definition der Volumen ***

VA,1,2,3,4,5,6	!Schweißnahtvolumen	Volumen Nr. 1
VA,3,7,20,13,14,17	!Grobkornzone	Volumen Nr. 2
VA,20,8,21,12,15,18	!Feinkornzone	Volumen Nr. 3
VA,21,9,10,11,16,19	!Blechvolumen	Volumen Nr. 4

VGLUE,all !Verkleben der Teilvolumen zu einem Gesamtvolumen

! *** Vernetzen des Volumens ***

TYPE,1 !Aktivierung des Temperatur-Volumenelementes SOLID70

NUMSTR,NODE,1 !Beginn der Knotennummerierung mit Nr.1

VSEL,S,VOLU,,1 !Selektion des Schweißnahtvolumens

VMESH,all !Vernetzung des Volumens Nr. 1 mit Elementen (Schweißnaht)

!Bestimmung der maximalen Knotennummer im Schweißnahtvolumen

*GET,MAXNUM,NODE,0,NUM,MAX

MAXNUM=MAXNUM+1 !Startwert für Knotennummer im Volumen Nr. 2

!Beginn der Knotennummerierung mit maximaler Nummer aus Volumen Nr.1 + 1

NUMSTR,NODE,MAXNUM

TYPE,1 !Aktivierung des Temperatur-Volumenelementes SOLID70

```
VSEL,S,VOLU,,2          !Selektion des Volumens Nr. 2
VMESH,all               !Vernetzung des Volumens Nr. 2 mit Elementen

*GET,MAXNUM,NODE,0,NUM,MAX  !Bestimmung der maximalen Knotennummer im Volu-
    men Nr. 2

VSEL,S,VOLU,,3,4        !Selektion des Restvolumens Nr.3 bis Nr.4
VMESH,3,4               !Vernetzung des Volumens von Nr. 3 bis Nr. 4 mit Ele-
    menten
!*go,:Auswert

! *** Ende Preprocessing ***

FINI                    !Beenden des Preprocessing-Moduls
SAVE                    !Sichern der Daten

! *** Aufruf der Solution ***

/SOLU                   !Aufruf des Lösungsprozessors
ANTYPE,TRANS,NEW        !Festlegen der Analyseart, hier transient = zeitabhängig

! *** Berechnung des stationären Anfangszustandes bei t=0.0001 sec ***

TIMINT,off,all          !Ausschalten der transienten Effekte
TIME,0.0001             !Zeit am Ende des ersten Lastfalls

ALLSEL

D,all,temp,bauteil      !Aufbringen der Umgebungstemperatur auf alle Knoten

SOLVE                   !Starten der Lösungsberechnung

! *** Berechnung der Ausgangstemperatur der Schweißnaht zur Materialzuw. ***

TIMINT,on,all           !Einschalten aller transienten Effekte
tintp,,,1

TIME,0.0002

AUTOTS,on               !Automatische Zeitschrittfolge ein/aus
KBC,kbscht              !Art der Temperaturaufbringung

SOLCONTROL,on          !Grafische Kontrolle des Lösungsverlaufs einschalten
```



```
LNSRCH,on          !Wichtig, LNSRCH muss immer hinter SOLCONTROL stehen,
                   ! da es sonst ausgeschaltet wird!
nsubst,30,200,5    !Anzahl der Zwischenschritte für Delta-Time
neqit,200          !Maximale Anzahl der Gleichgewichtsiterationen pro Substep
cnvt,heat,1,0.01
rescontrol,define,all
NCNV,0

DDELE,ALL,TEMP     !Freigeben der vorher festgelegten Anfangstemperaturen

ALLSEL

VSEL,S,VOLU,,1     !Auswahl des Schweißnahtvolumens NR. 1
NSLV,S,1           !Selektion aller Schweißnahtknoten
D,all,temp,5       !Zuweisung von 5 Grad Celsius

ALLSEL

VSEL,S,VOLU,,2     !Auswahl des Volumens Nr. 2 (HEZ)
NSLV,S,1           !Selektion aller Schweißnahtknoten
D,all,temp,20      !Zuweisung von 20 Grad Celsius

ALLSEL

SOLVE

! *** Berechnung des transienten Temperaturfeldes ***

TIMINT,on,all      !Einschalten aller transienten Effekte
tintp,,,,1
AUTOTS,on          !Automatische Zeitschrittfolge ein/aus
KBC,kbscht         !Art der Temperatureaufbringung

SOLCONTROL,on      !Grafische Kontrolle des Lösungsverlaufs einschalten
LNSRCH,on          !Wichtig, LNSRCH muss immer hinter SOLCONTROL stehen, da es
                   !sonst ausgeschaltet wird!
nsubst,30,200,5    !Anzahl der Zwischenschritte für Delta-Time
neqit,200          !Maximale Anzahl der Gleichgewichtsiterationen pro Substep
cnvt,heat,1,0.01
rescontrol,define,all
NCNV,0

DDELE,ALL,TEMP     !Freigeben der vorher festgelegten Anfangstemperaturen
```

```
ZEITELEM=0.0001+(schwei/tl6) !Steuerung zur Schweißnahtaktiv. (Kontrollzeit)
TEIL=VORLAUF !Gleichsetzen der Einbaugröße mit Vorlauf
```

```
ALLSEL
```

```
VSEL,S,VOLU,,1 !Auswahl des Schweißnahtvolumens NR. 1
ESLV,S !Selektion aller Schweißnahtelemente
EKILL,ALL !Deaktivieren aller Schweißnahtelemente
```

```
ALLSEL
```

```
*DO,I,1,zeittteil+1 !Durchfahren der Schweißnahtlänge bis Lichtbogen
!am Rand ist
```

```
Zeit=Zeit+Eldauer !Bestimmung des Zeitpunktes zur Bewegung des
!Lichtbogens
TIME,Zeit !Die Zeiteilung wird durch die Elementgröße bestimmt
```

```
*IF,ZEIT,GE,SCHWEI,THEN
```

```
*go,:Nahtendl !Naht ist fertig und wird nicht erweitert
```

```
*ENDIF
```

```
*IF,ZEIT,LE,ZEITELEM,THEN
```

```
ESEL,S,ELEM,,1 !Selektion aller Schweißnahtelemente
```

```
Querschn=tl5*tl4 !Bestimmung der Anzahl der Elemente
!bezogen auf den Schweißnahtquerschnitt
```

```
*DO,XRI,1,Querschn !Schleife zum Aktiv. der Schweißnahtelem.
```

```
xricht=xricht+tl6 !Anfangselementnummer
yricht=xricht+Teil-1 !Endelementnummer
```

```
ESEL,A,ELEM,,xricht,yricht !Selektion der ausgewählten
Elemente
```

```
*ENDDO !Schleifenende
```

```
EALIVE,ALL                !Aktivierung der Elemente

xricht=1-tl6              !Zurücksetzen des Startwertes
                           !für die Schweißnahtaktivierung

*ENDIF

*IF, Zeit, GT, ZEITELEM, then

    *IF, TEIL, LT, TL6, THEN

        Teil=Teil+1        !Vorbau der Schweißnaht

    *ENDIF

    ZEITELEM=ZEITELEM+SCHWEI/TL6 !Korrektur der Kontrollzeit
                                ! zur Schweißnahtaktivierung

*ENDIF

:Nahtendl

LOCAL, 11, 0, 0, Y1, Z1, 180 !Erzeugung eines aktiven lokalen Koordinatensy-
    stems Nr. 11

                                !Verschiebung in den Keypoint Nr. 1 mit Drehung um
                                !180 Grad um die z-Achse

*DO, KNOTEN, 1, MAXNUM        !Zuweisung der Wärmequellrate zu den Schwei-
                                !nahtknoten (Bodyload) im Volumen Nr. 1 und Nr. 2

    n_posx=nx(Knoten)         !Koordinatenbestimmung des aktuellen Knotens
    n_posy=ny(Knoten)         !Koordinatenbestimmung des aktuellen Knotens
    n_posz=nz(Knoten)         !Koordinatenbestimmung des aktuellen Knotens

    Abstlich=(Zeit/Eldauer-1)*breit/(tl6*unteil) !Bestimmung der Lage
                                                !der Elektrode vom Rand

    expoa=(-3*n_posx**2)/(alang**2)
    expob=(-3*n_posz**2)/(blang**2)
    expoc1=(-3*(n_posy-Abstlich)**2)/(c1lang**2)
    expoc2=(-3*(n_posy-Abstlich)**2)/(c2lang**2)

    *IF, expoa, LT, -80, THEN
        expoa=-80
    *ENDIF

*ENDIF
```

[illegible]

```
SOLVE                !Starten der Lösungsberechnung

*ENDDO              !Ende der Schleife, Lichtbogen um ein Element verschieben

! * Berechnung des trans. Temp.-feldes vom Schweißende bis Einwirkungsende *

*DO,KNOTEN,1,MAXNUM      !Nullsetzen der Wärmequellrate zu
                        !den Schweißnahtknoten (Bodyload)
                        !im Volumen Nr. 1 und Nr. 2

BF,Knoten,HGEN,0        !Zuweisung der Wärmedichte dem Knoten

*ENDDO              !Schleifenende

*DO,I,1,Anzschla-1

    Zeit=Zeit+Zeitabl    !Bestimmung des aktuellen Zeitpunktes
    TIME,Zeit           !Zuweisen der aktuellen Zeit zum Lastschritt

! * Temperatur der Einspannstirnfläche festlegen *

ASEL,S,AREA,,10        !Selektion der Stirnseitenfläche
NSLA,S,1               !Selektion aller Knoten auf der Stirnfläche
D,all,TEMP,einspan      !Knotentemperaturen an der Einspannung

ALLSEL

! * Aufbringen der Konvektionslast *

makroal,umgeb,epsilon,breit    !Aufruf des Makros zu Bestimmung der
                                !Wärmeübergangskoeffizienten

ALLSEL

Solve                    !Starten der Lösungsberechnung

*ENDDO                  !Ende der Schleife, Zeit um einen
                        !Abschnitt erhöhen

! * Berechnung des trans. Temp.-feldes vom Einw.-ende bis Simulationsende *
```



```
! *** Aufruf der Solution ***

/SOLU                                !Aufruf des Lösungsprozessors

ANTYPE,TRANS,NEW                    !Festlegen der Analyseart, hier transient = zeitabhän-
gig

TIMINT,on,all                       !Einschalten aller transienten Effekte
tintp,,,,1.0
AUTOTS,on                           !Automatische Zeitschrittfolge ein/aus
KBC,0                               !Art der Temperaturaufbringung "rampenförmig"

SOLCONTROL,on                       !Grafische Kontrolle des Lösungsverlaufs einschalten
LNSRCH,on                           !Wichtig, LNSRCH muss immer hinter SOLCONTROL stehen,
!da es sonst ausgeschaltet wird!

!NLGEOM,on                          !Berücksichtigung großer Verformungen
CUTCONTROL,PLSLIMIT,5              !Festlegung der plast. Dehngrenze pro Steb auf 300%

nsubst,1,200,1                      !Anzahl der Zwischenschritte für Delta-Time
!Begin mit 1, maximal 200, Anfangswert 1
neqit,400                           !Maximale Anzahl der Gleichgew.-iterat. pro Substep
cnvt,u,1,0.01                       !Konvergenzkriterium für Verschiebung
!rescontrol,,last                   !Es werden keine "multiframe restart files" erzeugt
NCNV,0

Zeit=0.0001                          !Zeitindex für Schweißnahtelementsteuerung auf Null
Teil=2                              !Steuerungsvariable für Schweißnahtelement
XRI=0
xricht=1-tl6

ALLSEL

VSEL,S,VOLU,,1                      !Auswahl des Schweißnahtvolumens NR. 1
ESLV,S                              !Selektion aller Schweißnahtelemente
EKILL,ALL                           !Deaktivieren aller Schweißnahtelemente

ALLSEL

ASEL,S,AREA,,10                     !Selektion der Stirnseitenfläche
NSLA,S,1                             !Selektion aller Knoten auf der Stirnfläche
D,ALL,UX,0                          !Lagerungsbedingung: Halterung in x-Richtung
```

```
D,ALL,UY,0      !      Halterung in y-Richtung
D,ALL,UZ,0      !      Halterung in z-Richtung
```

```
ALLSEL
```

```
ASEL,S,AREA,,1      !Selektion der Symmetrieachse der Schweißnaht
NSLA,S,1      !Selektion aller Knoten auf der Symmetrieachse
D,ALL,UX,0      !Lagerungsbedingung: Halterung in x-Richtung
```

```
ALLSEL
```

```
! *** Ermittlung des Einwirkungsschriebes (harmonische Sinusschwingung) ***
```

```
*AFUN,RAD      !Umstellung auf RAD als Winkeleinheit
```

```
Anzstutz=frequenz*(schwei+dauer)*stutz+1      !Berechnung der Stützstelle-
                                                !zahl für die Schweißzeit und
                                                !Belastungsdauer
```

```
*DIM,deltazei,ARRAY,Anzstutz,1      !Freihalten der Zeitpunkte für die Sinu-
                                      !belastung mit "Anzstutz"-Werten in
                                      !1 Spalte
```

```
*DIM,Verschie,ARRAY,Anzstutz,1      !Freihalten der Verschiebungspunkte für
                                      !die Sinusbelastung mit "Anzstutz"-Werten
                                      !in 1 Spalte
```

```
omega=2*pi*frequenz      !Berechnung der Kreisfrequenz
Zeitzuwa=(schwei+dauer)/(anzstutz-1)      !Zeitzuwachs pro Stützstelle
```

```
*DO,I,1,Anzstutz      !Einlesen/Zuweisen der Verschiebungswerte
```

```
  *IF,I,eq,1,THEN      !Zuweisung des ersten Wertepaares
    deltazei(1)=0.0001      !Zeitstartwert auf 0.0001 sec gesetzt
    Verschie(1)=0      !Verschiebung ist Null
  *ENDIF
```

```
  *IF,I,gt,1,THEN      !Zuweisung der übrigen Wertepaare
    deltazei(I)=deltazei(I-1)+zeitzuwa      !Zuweisung des Zeitwertes
    Verschie(I)=Ampli*sin(omega*deltazei(I))      !Zuweisung der Verschiebung
  *ENDIF
```

```
*ENDDO
```



```
! *** Einwirkungsaufbringung und Einleiten der Lösungsroutine bis Schweißnahtende ***
```

```
*DO, I, 1, frequenz*schwei*stutz
```

```
Time, Deltazei (I)
```

```
*IF, DELTAZEI (I), GE, SCHWEI, THEN
```

```
    LVAR=I                !Setzen der Übergabe des Laufvariablenzählers
```

```
    *go, :Nahtende        !Naht ist fertig und wird nicht erweitert
```

```
*ENDIF
```

```
*IF, DELTAZEI (I), LE, ZEIT, THEN
```

```
    ESEL, S, ELEM, , 1    !Selektion aller Schweißnahtelemente
```

```
    Querschn=tl5*tl4      !Bestimmung der Anzahl der Elemente  
                          ! bezogen auf den Schweißnahtquerschnitt
```

```
    *DO, XRI, 1, Querschn  !Schleife zum Aktivieren der Schweißnaht-  
elemente
```

```
        xricht=xricht+tl6      !Anfangselementnummer
```

```
        yricht=xricht+Teil-1    !Endelementnummer
```

```
        ESEL, A, ELEM, , xricht, yricht  !Selektion der ausgewählten  
Elemente
```

```
    *ENDDO                !Schleifenende
```

```
    EALIVE, ALL            !Aktivierung der Elemente
```

```
    xricht=1-tl6          !Zurücksetzen des Startwertes für die  
                          !Schweißnahtaktivierung
```

```
*ENDIF
```

```
*IF, DELTAZEI (I), GT, ZEIT, THEN
```

```
    *IF, TEIL, LT, tl6, then
```

```
        Teil=Teil+1          !Vorbau der Schweißnaht
```

```
*ENDIF

ZEIT=ZEIT+SCHWEI/TL6      !Korrektur der Kontrollzeit zur Schwei-
                           !nahtaktivierung

*ENDIF

! *** Aufbringen der Verschiebung ***

ASEL,S,AREA,,10           !Selektion der Stirnseitenfläche
NSLA,S,1                  !Selektion aller Knoten auf der Stirnfläche
D,ALL,UX,Verschie(I)     !Verschiebung der Auflagerknoten in x-Richtung

ALLSEL

! *** Aufbringen der Temperaturbelastung ***

LDREAD,TEMP,,,Deltazei(I),,,rth !Auslesen der Temperaturen zum Zeitpunkt
    "Deltazei" aus Jobname.RTH

SOLVE                     !Starten der Lösungsroutine

LVAR=I                    !Setzen der Übergabe des Laufvariablenzählers

*ENDDO

:Nahtende

! *** Aufbringen der mechanischen Bewegung nach dem Schweißende ***

LVAR=LVAR+1

*DO,I,LVAR,Anzstutz

    Time,Deltazei(I)

    ASEL,S,AREA,,10       !Selektion der Stirnseitenfläche
    NSLA,S,1              !Selektion aller Knoten auf der Stirnfläche
    D,ALL,UX,Verschie(I)  !Verschiebung der Auflagerknoten in x-Richtung

    ALLSEL
```

```
! *** Aufbringen der Temperaturbelastung ***

LDREAD,TEMP,,,Deltazei(I),,,rth  !Auslesen der Temperaturen zum Zeitpunkt
                                   !"Deltazei" aus Jobname.RTH

SOLVE                             !Starten der Lösungsroutine

*ENDDO

! *** Bis hier wird die mechanische Bewegung sowie die Temperatur aufgebracht
***

! *** Aufbringung der Temperatureinwirkung bis zum Abkühlende ***

!Abkuzei=(schwei+Dauer)-Zeitab2    !Berechnung des Startwertes für die
                                   !Restsimulation
Abkuzei=(schwei+Dauer)             !Berechnung des Startwertes für die
                                   !Restsimulation
*DO,I,1,Anzende

    Abkuzei=Abkuzei+Zeitab2        !Berechnung der aktuellen Simulationszeit

    Time,Abkuzei                   !Zuweisen der aktuellen Simulationszeit

    ALLSEL

    ASEL,S,AREA,,10                !Selektion der Stirnseitenfläche
    NSLA,S,1                       !Selektion aller Knoten auf der Stirnfläche
    D,ALL,UX,0                     !Lagerungsbedingung:  Halterung in x-Richtung
    D,ALL,UY,0                     !                               Halterung in y-Richtung
    D,ALL,UZ,0                     !                               Halterung in z-Richtung

    ALLSEL

    ASEL,S,AREA,,1                !Selektion der Symmetrieachse der Schweißnaht
    NSLA,S,1                       !Selektion aller Knoten auf der Symmetrieachse
    D,ALL,UX,0                     !Lagerungsbedingung:  Halterung in x-Richtung

    ALLSEL

! * Aufbringen der Temperaturbelastung *

LDREAD,TEMP,,,Abkuzei,,,rth !Auslesen der Temperaturen zum Zeitpunkt
```

!"Abkuzei" aus Jobname.RTH

SOLVE

!Starten der Lösungsroutine

*ENDDO

save

fini

!Ende des Batch-Files

A23 Programmcode des Ansys®-Makrofiles zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten an einer ebenen Platte

```

!*****
!*** Makro zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten infolge ***
!*** Konvektion und Strahlung ***
!*** Ansys-Version 8.1 Macro-File-Version vom 05.12.2005 ***
!*****

!*** Koeffizienten für die Approximation ***

!Wärmeleitfähigkeit
Warmu=2.44708305411262/100
Warmb=6.89730785203827/100000
Warmc=-1.27062965629916/100000000

!kinematische Viskosität
Viskoa=1.30053552651195/100000
Viskob=9.96540790902707/100000000
Viskoc=7.36994556649633/(10**11)

!Prandtl-Zahl
Pranda=0.710990280522076
Prandb=-1.36780686898173/100000
Prandc=5.12571129277655/100000000

!Stefan-Boltzmann-Konstante
Stefbo=5.67051/100000000

ALLSEL                                !Alles selektieren

!*** Nullsetzen der Variablen ***
temp_s=0                              !Nullsetzen der Summentemperatur

!*** Wärmeübergangskoeffizient für Fläche Nr. 5 oben, 2,4,6 unten/seite ***

ASEL,S,AREA,,5                        !Neuselektion der Teilfläche Nr.5
NSLA,S,0                              !Neuselektion aller Knoten der Teilfläche
Nr. 5
*GET,KNZAHL,NODE,,COUNT              !Bestimmung der Anzahl der selektierten
Knoten
*DO,JJ,1,KNZAHL,1                     !Schleife von 1 bis max. Knotenzahl,
Schrittweite 1
    *GET,KNMIN,NODE,,NUM,MIN           !Ermittlung der kleinsten Knotennummer
    temp_s=temp(KNMIN)+temp_s          !Aufsummierung der Knotentemperaturen der
Teilfläche Nr. 5
    NSEL,U,NODE,,KNMIN                 !Entfernen der kleinsten Knotennummer aus
der Selektion
*ENDDO                                 !Beenden der Schleife

MW_temp=temp_s/KNZAHL                  !Mittelwertbestimmung der Temperatur in
Fläche Nr. 5

MT_LUBL=(MW_temp+Umgeb)/2              !Mittlere Temperatur Luft/Bauteil

!Ermittlung der Grasshof-Zahl
Grass=(9.81*(breit**3))/((Viskoa+Viskob*MT_LUBL+Viskoc*(MT_LUBL**2))**2)*(1/(
273.15+umgeb))*ABS(MW_temp-umgeb)

```

```

!Prandtl-Zahl
Prand=pranda+prandb*MT_LUBL+prandc*MT_LUBL**2

!Rayleigh-Zahl
Raylei=Grass*Prand

!*** Nusselt-Zahl ***
!*** Bestimmung in Abhängigkeit von laminarer oder turbulenter Strömung,
!*** gem. VDI-Atlas ***

*IF, Raylei, LT, 40000000, THEN

    !Nusselt-Zahl, laminarer Bereich
    Nussel=0.70*Raylei**0.25

*ENDIF

*IF, Raylei, GE, 40000000, THEN

    !Nusselt-Zahl, turbulenter Bereich
    Nussel=0.155*Raylei**(1/3)

*ENDIF                !Beendigung der Abfrage zur Berechnung der Nusselt-Zahl

!*** Berechnung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten für Fläche Nr. 5
!(oben) 2,4,6 (unten,seite)

!Alpha, oben, konvektiv
alkonv_o=(Nussel*(warma+warmb*MT_LUBL+warmc*(MT_LUBL**2)))/breit
!Alpha, unten, konvektiv
alkonv_u=alkonv_o/2

!*** Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten infolge Strahlung ***

al-
stra=epsilon*Stefbo*((273.15+MW_temp)**2+(273.15+umgeb)**2)*((273.15+MW_temp)
+(273.15+umgeb))

!*** Bestimmung des Gesamtwärmeübergangskoeffizienten für die Flächen Nr. 5
!(oben) 2,4,6 (unten,seite)

alges_o=alkonv_o+alstra                !Alpha-gesamt, oben
alges_u=alkonv_u+alstra                !Alpha-gesamt, unten

!*** Aufbringen der Konvektionslast ***

ALLSEL

ASEL, S, AREA, , 5                    !Selektion der Fläche Nr. 5
NSLA, S, 1                            !Selektion aller Knoten auf der selektier-
ten Fläche
SF, ALL, CONV, alges_o, umgeb         !Aufbringen der Konvektionslast
! (Alpha, oben, konvektiv)

ALLSEL

ASEL, S, AREA, , 2                    !Selektion der Fläche Nr. 2
ASEL, A, AREA, , 4                    !Selektion der Fläche Nr. 4
ASEL, A, AREA, , 6                    !Selektion der Fläche Nr. 6
NSLA, S, 1                            !Selektion aller Knoten auf der
!selektierten Fläche

```

```
SF,ALL,CONV,alges_u,umgeb      !Aufbringen der Konvektionslast
                                ! (Alpha,oben,konvektiv)

ALLSEL                          !Alles selektieren

!Nullsetzen der Variablen

temp_s=0                        !Nullsetzen der Summentemperatur

!*** Wärmeübergangskoeffizient für Fläche Nr. 14 oben, 7,13,17 unten/seite

ASEL,S,AREA,,14                !Neuselektion der Teilfläche Nr.14
NSLA,S,0                        !Neuselektion aller Knoten der Teilfläche
Nr. 14
*GET,KNZAHL,NODE,,COUNT       !Bestimmung der Anzahl der selektierten
Knoten
*DO,JJ,1,KNZAHL,1              !Schleife von 1 bis max. Knotenzahl,
Schrittweite 1
    *GET,KNMIN,NODE,,NUM,MIN    !Ermittlung der kleinsten Knotennummer
    temp_s=temp(KNMIN)+temp_s   !Aufsummierung der Knotentemperaturen der
Teilfläche Nr. 14
    NSEL,U,NODE,,KNMIN         !Entfernen der kleinsten Knotennummer aus
der Selektion
*ENDDO                          !Beenden der Schleife

MW_temp=temp_s/KNZAHL          !Mittelwertbestimmung der Temperatur in
Fläche Nr. 14

MT_LUBL=(MW_temp+Umgeb)/2       !Mittlere Temperatur Luft/Bauteil

!Ermittlung der Grasshof-Zahl
Grass=(9.81*(breit**3))/((Viskoa+Viskob*MT_LUBL+Viskoc*(MT_LUBL**2))**2)*(1/(
273.15+umgeb))*ABS(MW_temp-umgeb)

!Prandtl-Zahl
Prand=pranda+prandb*MT_LUBL+prandc*MT_LUBL**2

!Rayleigh-Zahl
Raylei=Grass*Prand

!*** Nusselt-Zahl ***
!*** Bestimmung in Abhängigkeit von laminarer oder turbulenter Strömung,
!*** gem. VDI-Atlas

*IF,Raylei,LT,40000000,THEN

    !Nusselt-Zahl, laminarer Bereich
    Nussel=0.70*Raylei**0.25

*ENDIF

*IF,Raylei,GE,40000000,THEN

    !Nusselt-Zahl, turbulenter Bereich
    Nussel=0.155*Raylei**(1/3)

*ENDIF                          !Beendigung der Abfrage zur Berechnung der Nusselt-Zahl

!*** Berechnung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten für Fläche Nr. 14
(oben) 7,13,17 (unten,seite) ***
```

```

!Alpha, oben, konvektiv
alkonv_o=(Nussel*(warma+warmb*MT_LUBL+warmc*(MT_LUBL**2)))/breit

!Alpha, unten, konvektiv
alkonv_u=alkonv_o/2

!*** Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten infolge Strahlung ***

al-
stra=epsilon*Stefbo*((273.15+MW_temp)**2+(273.15+umgeb)**2)*((273.15+MW_temp)
+(273.15+umgeb))

!*** Bestimmung des Gesamtwärmeübergangskoeffizienten für die Flächen Nr. 14
(oben) 7,13,17 (unten,seite)***

alges_o=alkonv_o+alstra           !Alpha-gesamt, oben
alges_u=alkonv_u+alstra           !Alpha-gesamt, unten

!*** Aufbringen der Konvektionslast ***

ALLSEL

ASEL,S,AREA,,14                   !Selektion der Fläche Nr. 14
NSLA,S,1                           !Selektion aller Knoten auf der selektier-
ten Fläche
SF,ALL,CONV,alges_o,umgeb         !Aufbringen der Konvektionslast
                                   ! (Alpha, oben, konvektiv)

ALLSEL

ASEL,S,AREA,,7                     !Selektion der Fläche Nr. 7
ASEL,A,AREA,,13                   !Selektion der Fläche Nr. 13
ASEL,A,AREA,,17                   !Selektion der Fläche Nr. 17
NSLA,S,1                           !Selektion aller Knoten auf der selektier-
ten Fläche
SF,ALL,CONV,alges_u,umgeb         !Aufbringen der Konvektionslast
                                   ! (Alpha, oben, konvektiv)

ALLSEL                             !Alles selektieren

!Nullsetzen der Variablen
temp_s=0                           !Nullsetzen der Summentemperatur

!*** Wärmeübergangskoeffizient für Fläche Nr. 15 oben, 8,12,18 unten/seite

ASEL,S,AREA,,15                   !Neuselektion der Teilfläche Nr.15
NSLA,S,0                           !Neuselektion aller Knoten der Teilfläche
Nr. 15
*GET,KNZAHL,NODE,,COUNT          !Bestimmung der Anzahl der selektierten
Knoten
*DO,JJ,1,KNZAHL,1                 !Schleife von 1 bis max. Knotenzahl,
Schrittweite 1
    *GET,KNMIN,NODE,,NUM,MIN       !Ermittlung der kleinsten Knotennummer
    temp_s=temp(KNMIN)+temp_s      !Aufsummierung der Knotentemperaturen
                                   !der Teilfläche Nr. 15
    NSEL,U,NODE,,KNMIN             !Entfernen der kleinsten Knotennummer
                                   !aus der Selektion
*ENDDO                             !Beenden der Schleife

MW_temp=temp_s/KNZAHL              !Mittelwertbestimmung der Temperatur

```



```
!in Fläche Nr. 15

MT_LUBL=(MW_temp+Umgeb)/2           !Mittlere Temperatur Luft/Bauteil

!Ermittlung der Grasshof-Zahl
Grass=(9.81*(breit**3))/((Viskoa+Viskob*MT_LUBL+Viskoc*(MT_LUBL**2))**2)*(1/(
273.15+umgeb))*ABS(MW_temp-umgeb)

!Prandtl-Zahl
Prand=pranda+prandb*MT_LUBL+prandc*MT_LUBL**2

!Rayleigh-Zahl
Raylei=Grass*Prand

!Nusselt-Zahl
!Bestimmung in Abhängigkeit von laminarer oder turbulenter Strömung,
!gem. VDI-Atlas

*IF,Raylei,LT,40000000,THEN

    !Nusselt-Zahl, laminarer Bereich
    Nussel=0.70*Raylei**0.25

*ENDIF

*IF,Raylei,GE,40000000,THEN

    !Nusselt-Zahl, turbulenter Bereich
    Nussel=0.155*Raylei**(1/3)

*ENDIF           !Beendigung der Abfrage zur Berechnung der Nusselt-Zahl

!*** Berechnung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten für Fläche Nr. 15
!(oben) 8,12,18 (unten,seite) ***

!Alpha, oben, konvektiv
alkonv_o=(Nussel*(warma+warmb*MT_LUBL+warmc*(MT_LUBL**2)))/breit

!Alpha, unten, konvektiv
alkonv_u=alkonv_o/2

!*** Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten infolge Strahlung ***

al-
stra=epsilon*Stefbo*((273.15+MW_temp)**2+(273.15+umgeb)**2)*((273.15+MW_temp)
+(273.15+umgeb))

!*** Bestimmung des Gesamtwärmeübergangskoeffizienten für die Flächen Nr. 15
!(oben) 8,12,18 (unten,seite)***

alges_o=alkonv_o+alstra           !Alpha-gesamt, oben
alges_u=alkonv_u+alstra           !Alpha-gesamt, unten

!*** Aufbringen der Konvektionslast ***

ALLSEL

ASEL,S,AREA,,15           !Selektion der Fläche Nr. 15
NSLA,S,1           !Selektion aller Knoten auf der
!selektierten Fläche
SF,ALL,CONV,alges_o,umgeb           !Aufbringen der Konvektionslast
```

```

! (Alpha, oben, konvektiv)

ALLSEL

ASEL, S, AREA, , 8      !Selektion der Fläche Nr. 8
ASEL, A, AREA, , 12     !Selektion der Fläche Nr. 12
ASEL, A, AREA, , 18     !Selektion der Fläche Nr. 18
NSLA, S, 1              !Selektion aller Knoten auf der
                        !selektierten Fläche
SF, ALL, CONV, alges_u, umgeb !Aufbringen der Konvektionslast
                        ! (Alpha, oben, konvektiv)

ALLSEL                  !Alles selektieren

!Nullsetzen der Variablen
temp_s=0                !Nullsetzen der Summentemperatur

!*** Wärmeübergangskoeffizient für Fläche Nr. 16 oben, 9,10,11,19 unten/seite
***

ASEL, S, AREA, , 16     !Neuselektion der Teilfläche Nr.16
NSLA, S, 0              !Neuselektion aller Knoten der Teilfläche
Nr. 16
*GET, KNZAHL, NODE, , COUNT !Bestimmung der Anzahl der selektierten
Knoten
*DO, JJ, 1, KNZAHL, 1    !Schleife von 1 bis max. Knotenzahl,
Schrittweite 1
    *GET, KNMIN, NODE, , NUM, MIN !Ermittlung der kleinsten Knotennummer
    temp_s=temp (KNMIN) +temp_s   !Aufsummierung der Knotentemperaturen
                                !der Teilfläche Nr. 16
    NSEL, U, NODE, , KNMIN       !Entfernen der kleinsten Knotennummer aus
der Selektion
*ENDDO                    !Beenden der Schleife

MW_temp=temp_s/KNZAHL    !Mittelwertbestimmung der Temperatur in
                        !Fläche Nr. 16

MT_LUBL=(MW_temp+Umgeb)/2 !Mittlere Temperatur Luft/Bauteil

!Ermittlung der Grasshof-Zahl
Grass=(9.81*(breit**3))/((Viskoa+Viskob*MT_LUBL+Viskoc*(MT_LUBL**2))**2)*(1/(
273.15+umgeb))*ABS(MW_temp-umgeb)

!Prandtl-Zahl
Prand=pranda+prandb*MT_LUBL+prandc*MT_LUBL**2

!Rayleigh-Zahl
Raylei=Grass*Prand

!*** Nusselt-Zahl ***
!*** Bestimmung in Abhängigkeit von laminarer oder turbulenter Strömung,
!*** gem. VDI-Atlas ***

*IF, Raylei, LT, 40000000, THEN

    !Nusselt-Zahl, laminarer Bereich
    Nussel=0.70*Raylei**0.25

*ENDIF

*IF, Raylei, GE, 40000000, THEN

```

```
!Nusselt-Zahl, turbulenter Bereich
Nussel=0.155*Raylei**(1/3)

*ENDIF                !Beendigung der Abfrage zur Berechnung der Nusselt-Zahl

!*** Berechnung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten für Fläche Nr. 16
(oben) 9,10,11,19 (unten,seite)***

!Alpha, oben, konvektiv
alkonv_o=(Nussel*(warma+warmb*MT_LUBL+warmc*(MT_LUBL**2)))/breit

!Alpha, unten, konvektiv
alkonv_u=alkonv_o/2

!*** Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten infolge Strahlung ***

al-
stra=epsilon*Stefbo*((273.15+MW_temp)**2+(273.15+umgeb)**2)*((273.15+MW_temp)
+(273.15+umgeb))

!*** Bestimmung des Gesamtwärmeübergangskoeffizienten für die Flächen Nr. 16
(oben) 9,10,11,19 (unten,seite)***

alges_o=alkonv_o+alstra                !Alpha-gesamt, oben
alges_u=alkonv_u+alstra                !Alpha-gesamt, unten

!*** Aufbringen der Konvektionslast ***

ALLSEL

ASEL,S,AREA,,16                        !Selektion der Fläche Nr. 16
NSLA,S,1                               !Selektion aller Knoten auf der selektier-
ten Fläche
SF,ALL,CONV,alges_o,umgeb              !Aufbringen der Konvektionslast
! (Alpha, oben, konvektiv)

ALLSEL

ASEL,S,AREA,,9                        !Selektion der Fläche Nr. 9
ASEL,A,AREA,,10                       !Selektion der Fläche Nr. 10
ASEL,A,AREA,,11                       !Selektion der Fläche Nr. 11
ASEL,A,AREA,,19                       !Selektion der Fläche Nr. 19
NSLA,S,1                               !Selektion aller Knoten auf der selektier-
ten Fläche
SF,ALL,CONV,alges_u,umgeb              !Aufbringen der Konvektionslast
! (Alpha, oben, konvektiv)

!ENDE DES MAKROS
```


LEBENS LAUF

Michael Wichers

geboren am 08. Dezember 1974 in Stade

verheiratet mit Sonja Wichers, geb. Sandte seit 08. April 2005

SCHULBILDUNG

1981 bis 1985	Pestalozzi-Grundschule, Stade
1985 bis 1987	Orientierungsstufe Camper Höhe, Stade
1987 bis 1991	Realschule Camper Höhe, Stade
1994 bis 1995	BBS I, Stade Fachoberschule Technik

BERUFS AUSBILDUNG

1991 bis 1992	BBS I, Stade Berufsgrundbildungsjahr Bautechnik
1992 bis 1994	Ausbildung zum Bauzeichner Fachrichtung Ingenieurbau Ingenieurbüro Fröhling & Partner, Harsefeld
1992 bis 1994	BBS Cadenberge Berufsschule, parallel zur betrieblichen Ausbildung

WEHRDIENST

1995	Ableistung des Grundwehrdienstes vom 01.07.1995 – 09.08.1995
------	---

HOCHSCHULBILDUNG

1995 bis 1999	Fachhochschule Nordostniedersachsen, Buxtehude Studiengang Bauingenieurwesen Vertiefungsrichtung : konstruktiver Ingenieurbau Abschluss : Dipl.-Ing. (FH)
1999 bis 2001	Studium an der TU Braunschweig Studiengang Bauingenieurwesen Vertiefungsfächer : Stahlbau Statik Massivbau Abschluss : Dipl.-Ing. (TU)

BERUFSTÄTIGKEIT

1999-2001	Wissenschaftlicher Hilfsassistent am Institut für Stahlbau der TU Braunschweig (Univ.-Prof. Dr.-Ing. Udo Peil)
2001-2006	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Stahlbau der TU Braunschweig (Univ.-Prof. Dr.-Ing. Udo Peil)

ZUSÄTZLICHE QUALIFIKATIONEN

1999	Erweiterte betontechnologische Ausbildung (Theorie)
2001	Mitglied der Ingenieurkammer Niedersachsen, Nr. 6303 Eintrag Entwurfsverfasserliste, Nr. 14918
2002	Ausbildung zum Schweißfachingenieur
2004	Fortbildung „Schweißaufsicht für Betonstahl“

NAME UND STAND DER ELTERN

Vater	:	Werner Wichers Beruf: Stahlbaukonstrukteur Fa. Stacon GmbH, Stade-Wiepenkathen
Mutter	:	Margrit Frieda Anna Wichers geb. Fesser Beruf: Bauzeichnerin Planungsamt Stadt Stade